



**FÁBIO JORGE  
DOMINGUES**

**ENSAIOS BIAXIAIS EM POLIPROPILENO**





**FÁBIO JORGE  
DOMINGUES**

## **ENSAIOS BIAXIAIS EM POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e Professor Alfredo Manuel Balacó de Moraes, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## **O júri**

Presidente

**Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

**Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva**

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

**Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Gostaria de manifestar os meus sinceros agradecimentos a todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

Ao meu orientador, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira por todo o apoio, dedicação e disponibilidade demonstrados no decorrer deste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes por toda a ajuda na organização e redação desta dissertação.

Ao Engenheiro António José da Fonseca Festas e ao Engenheiro Ricardo Nuno Barroso Pinto de Moraes Beja por todo apoio técnico fornecido.

Aos meus pais, por me terem apoiado financeiramente e proporcionado a oportunidade de continuar a minha formação académica e construção de um futuro melhor. À minha irmã por todo o apoio emocional e motivação dados ao longo destes anos.

Aos meus amigos que me acompanharam durante a realização deste curso e estiveram sempre presentes nos bons e maus momentos.





**Palavras-chave**

Ensaaios biaxiais; provetes cruciformes; correlação digital de imagem; ARAMIS; polipropileno; taxa de deformação.

**Resumo**

O presente trabalho teve como objetivo principal estudar o comportamento de amostras de polipropileno perante ensaios biaxiais de tração. Para tal efetuaram-se ensaios de provetes cruciformes utilizando uma máquina desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Por seu turno, recorreu-se ao sistema ARAMIS de correlação digital de imagem para medição das extensões. Os ensaios foram realizados a velocidades diferentes de modo a avaliar a sensibilidade do polipropileno à taxa de deformação. Foram também efetuados ensaios uniaxiais em condições semelhantes às dos ensaios biaxiais.

Os resultados obtidos permitiram verificar o bom funcionamento da máquina de ensaios biaxiais e o grande interesse em aplicar a correlação digital de imagem a este tipo de ensaios. Verificou-se também que, à semelhança do que sucede nos ensaios uniaxiais, há uma grande influência da taxa de deformação no comportamento à tração biaxial do polipropileno, sobretudo na extensão de rutura. Por fim, os resultados mostraram que é necessário melhorar a geometria do provete cruciforme no sentido de obter a iniciação da rutura na zona de medida.



**Keywords**

Biaxial tests; cruciform specimen; digital image correlation; ARAMIS; polypropylene; strain rate;

**Abstract**

The main objective of this work was to evaluate the behaviour of polypropylene samples under biaxial tension tests. For that purpose, biaxial tests were conducted on cruciform specimens using a testing machine developed at the Mechanical Engineering Department of the University of Aveiro. The ARAMIS digital image correlation system was used for strain measurements. The tests were conducted at different velocities in order to evaluate the strain-rate sensitivity of polypropylene. Uniaxial tests were also performed under conditions similar to those of the biaxial tests.

The results demonstrated the adequate functioning of the biaxial testing machine and the great interest in applying digital image correlation to this type of tests. Similar to uniaxial tests, the polypropylene biaxial tension behaviour proved to be strongly strain-rate sensitive, especially where the failure strain is concerned. Finally, the results showed the need to improve the cruciform specimen geometry in order to achieve failure initiation in the gauge area.



## Índice

1. Revisão Bibliográfica.....	1
1.1. Caracterização do material.....	3
1.2. Métodos de ensaios biaxiais .....	5
1.3. Máquinas de ensaios biaxiais.....	6
1.4. Máquina de ensaios biaxiais utilizada.....	11
1.5. Correlação digital de imagem .....	14
1.5.1. Correlação digital de imagem 2D.....	15
1.5.2. Correlação digital de imagem 3D.....	16
1.6. Sensibilidade dos polímeros à taxa de deformação .....	17
2. Procedimento experimental.....	19
2.1. Provetes ensaiados .....	21
2.2. Ensaio uniaxiais.....	23
2.2.1. Preparação dos provetes .....	24
2.2.2. Tratamento de dados.....	26
2.3. Ensaio Biaxiais .....	27
2.3.1. Preparação dos provetes .....	27
2.3.2. Preparação da máquina de ensaios biaxiais.....	29
2.3.3. Preparação do sistema de medição de deformações.....	31
2.3.4. Tratamento de dados.....	31
3. Resultados e discussão .....	33
3.1. Ensaio Uniaxiais.....	35
3.2. Ensaio biaxiais.....	37
4. Conclusões e trabalhos futuros.....	55
Bibliografia.....	59
Anexos.....	65
Anexo 1 – Propriedades do material utilizado nos provetes.....	67
Anexo 2 – Setup do ARAMIS .....	69
Anexo 3 – Calibração do ARAMIS .....	83



## Índice de figuras

Figura 1 - Comportamento típico de materiais sob combinação de duas tensões normais [3].	4
Figura 2- Diagrama limite de deformação (a) deformações de cedência esperadas, (b) deformações reais aplicando tensão uniaxial seguida de tensões biaxiais e (c) deformações reais aplicando tensões biaxiais seguidas de tensão uniaxial[5].	4
Figura 3- Propostas de geometria dos provetes cruciformes: (a), (b) e (c) [11]; (d) [5].	6
Figura 4- Provette sujeito a solicitação em: (a) Dois braços; (b) Quatro braços [11].	6
Figura 5- Máquina biaxial de Makinde e outros (imagem adaptada de [13]).	7
Figura 6- Máquina biaxial de Boehler e outros [14]: 1-Estrutura; 2-Unidade de alimentação; 3-Unidade analógica/lógica; 4-Painel de controlo; 5-Unidade de servo-controlo.	8
Figura 7 - Máquina biaxial de Kuwabara e outros [15].	8
Figura 8 - Mecanismo biaxial do Instituto Fraunhofer [17].	9
Figura 9 - Mecanismo biaxial de Ferron e Makinde [18].	10
Figura 10 - Mecanismo biaxial da Universidade de Tecnologia de Eindhoven [5].	10
Figura 11-Maquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 100 kN [20].	11
Figura 12 – Máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN [22].	12
Figura 13 – Dimensões gerais da máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN [22].	13
Figura 14 – Painel de controlo manual da máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN [22].	13
Figura 15 – Aplicação em LabView da máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN.	14
Figura 16 – O sistema de correlação digital de imagem ARAMIS 5M LT.	14
Figura 17 – Exemplo de configuração de sistema de correlação de imagem 2D [25].	15
Figura 18 – Exemplo de imagem antes e depois da deformação [25].	16
Figura 19 – Exemplo típico de padrão artificial aleatório [25].	16
Figura 20 – Representação gráfica de um sistema de visão estéreo [26].	17
Figura 21 - Curvas tensão-deformação de polipropileno medidas em [28].	18
Figura 22 - Provete para ensaios de tração uniaxial: a) fotografia, b) desenho.	21
Figura 23 - Fotografia de um provete cruciforme para ensaios biaxiais de tração-tração...	22
Figura 24 – Desenho dos provetes cruciformes.	23
Figura 25 – Máquina universal Shimadzu 50 kN-AG.	24
Figura 26 - Vídeo-extensómetro Messphysic ME 46 NG.	25
Figura 27 – Provete para ensaios uniaxiais com marcas óticas retangulares.	25
Figura 28 – Setup dos ensaios uniaxiais: a) vista geral; b) pormenor do provete.	26
Figura 29 – Pintura dos provetes	28
Figura 30 – Padrões a utilizar [23].	28
Figura 31 – Fotografia de um provete já pintado.	28
Figura 32 – Máquina biaxial com amarras centradas	29
Figura 33 – Esquema da colocação do provete na máquina biaxial.	30
Figura 34 – Provete colocado na máquina biaxial.	30
Figura 35 - Área aparente sob tensão no eixo x durante o ensaio biaxial.	31
Figura 36 – Fases iniciais das curvas tensão – deformação real dos ensaios uniaxiais.	35
Figura 37 – Curvas tensão-deformação real completas medidas nos ensaios uniaxiais.	36

Figura 38 - Extensão $\varepsilon_x$ em função da tensão aparente $\sigma_{AP,x}$ indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação). .....	39
Figura 39 - Extensão $\varepsilon_y$ em função da tensão aparente $\sigma_{AP,y}$ indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação). .....	41
Figura 40 - Extensão equivalente de von Mises em função da tensão aparente $\sigma_{AP,VM}$ indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação). .....	43
Figura 41 – Curvas de tensão aparente – deformação real dos eixos x e y de ensaio a 10 mm/min.....	44
Figura 42 – Fotografia de provete após o ensaio biaxial a 10 mm/min.....	45
Figura 43 - Extensão $\varepsilon_x$ em função da tensão aparente $\sigma_{AP,x}$ indicada no topo das imagens ao ao longo de ensaio a 1 mm/min (continuação). .....	47
Figura 44 - Extensão $\varepsilon_y$ em função da tensão aparente $\sigma_{AP,y}$ indicada no topo das imagens ao ao longo de ensaio a 1 mm/min (continuação). .....	49
Figura 45 - Extensão equivalente de von Mises em função da tensão aparente $\sigma_{AP,VM}$ indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 1 mm/min.....	51
Figura 46 - Curvas de tensão aparente – deformação real dos eixos x e y de ensaio a 1 mm/min.....	52
Figura 47 – Curvas $\sigma_{AP,VM} - \varepsilon_{VM}$ dos ensaios a 10 mm/min e 1 mm/min.....	52
Figura 48 – Provede cruciforme ensaiado a 1 mm/min.....	53



# **1. Revisão Bibliográfica**



## 1.1. Caracterização do material

Uma das maiores preocupações aquando da seleção de um material para um componente de uma máquina é assegurar que as suas propriedades são apropriadas para as condições de trabalho (1). A avaliação das suas propriedades físicas e mecânicas assume papel importante na seleção de materiais(2). Estas incluem características tais como a densidade, ponto de fusão, propriedades óticas (cor, etc.), propriedades térmicas (calor específico, coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica), condutividade elétrica e propriedades magnéticas. Nalguns casos, estas características podem ser de importância primordial mas, usualmente, as características responsáveis pela forma como o material responde às cargas aplicadas assumem posição dominante na seleção do material, e essas são as características mecânicas (3). Estas características incluem o módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de rutura, ductilidade, dureza, etc. As propriedades mecânicas são de grande importância na conceção porque a funcionalidade e o desempenho de um produto dependem da capacidade de resistência à deformação sob esforços em serviço (3).

Existem três tipos principais de tensões às quais os materiais podem estar sujeitos: tração, compressão e corte (3). Estas podem surgir de forma individual ou combinada (Figura 1). As curvas de tensão-deformação mostram as relações básicas que descrevem os três tipos de tensão. O ensaio mais utilizado para medir estas curvas é o ensaio de tração uniaxial (3). Quando o material é um metal isotrópico, existem vários modelos que permitem prever o comportamento do material em estados de tensão multiaxiais, como por exemplo, o critério de von Mises. Contudo, existem materiais com comportamento mecânico complexo, tais como os polímeros, cujo comportamento à tração é diferente do comportamento à compressão (4). Nestes casos, os ensaios uniaxiais são insuficientes.

Os ensaios uniaxiais são também limitados quando se pretende fazer um estudo aprofundado do comportamento plástico. Vários estudos demonstraram que as deformações máximas para ensaios biaxiais podem ser diferentes das que se esperam com base em resultados de ensaios uniaxiais (3),(5),(6). Na Figura 2 estão representados três diagramas de limite de deformação diferentes. Na Figura 2a) podem observar-se as deformações limite esperadas com base nos ensaios uniaxiais para uma folha de metal. Na Figura 2b) estão representadas as deformações limite quando a folha de metal é deformada inicialmente sob tensões uniaxiais e de seguida sob tensões biaxiais. Neste caso, verificou-se um aumento da

formabilidade do material. Já na Figura 2c) a folha de metal foi inicialmente solicitada biaxialmente e de seguida uniaxialmente, verificando-se neste caso uma diminuição da formabilidade.

Pode então dizer-se que os ensaios biaxiais são muito importantes para compreender o comportamento mecânico de um material para se poder aproveitar todo o seu potencial.

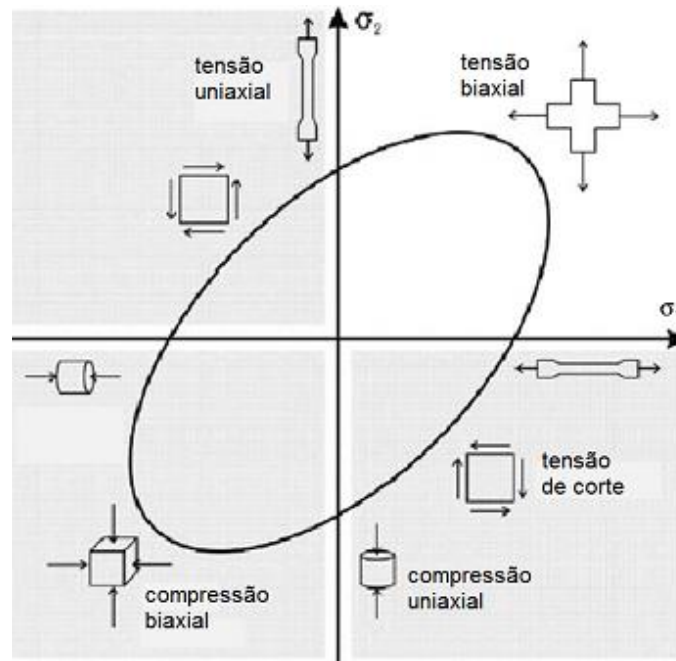


Figura 1 - Comportamento típico de materiais sob combinação de duas tensões normais (imagem adaptada de (3)).

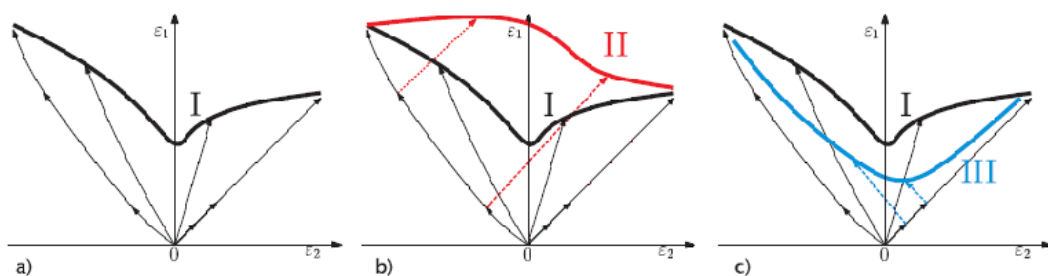


Figura 2- Diagrama limite de deformação (a) deformações de cedência esperadas, (b) deformações reais aplicando tensão uniaxial seguida de tensões biaxiais e (c) deformações reais aplicando tensões biaxiais seguidas de tensão uniaxial (5).

## **1.2. Métodos de ensaios biaxiais**

Ao longo das últimas décadas vários cientistas têm estudado métodos para deformar folhas de metal com vários tipos de deformação complexos (5). Por seu turno, os ensaios multiaxiais em compósitos são frequentemente baseados em ensaios feitos anteriormente em metais (7). A grande variedade de métodos existente explica-se em parte pela elevada anisotropia dos compósitos (7).

Os ensaios multiaxiais podem ser divididos em duas categorias distintas: ensaios com um único sistema de carregamento e ensaios onde se usam dois ou mais sistemas de carregamento independentes. Na primeira categoria incluem-se ensaios de flexão, ensaios com punção e ensaios de pressão hidrostática. Nestes casos, a tensão exercida depende da geometria do provete, da sua fixação e do sistema de aplicação de carga. Já na segunda categoria incluem-se ensaios de flexão-torção em barras cilíndricas, tubos de parede fina submetidos a uma combinação de cargas axiais com torção ou pressão interna/externa, e ensaios em provetes cruciformes no plano de carga axial. A tensão exercida nestes ensaios depende das cargas aplicadas por sistemas independentes. O método com tubos de parede fina é o mais popular (7).

Os ensaios biaxiais podem ainda ser classificados consoante o seu plano de trabalho. Nalguns ensaios, as forças são aplicadas no plano do provete e noutros fora dele. Como os ensaios com esforços fora do plano da amostra dão origem a flexão, os ensaios com esforços no plano são preferíveis. Estes tornam a medição das tensões e das deformações menos complicada (3). Alguns estudos mostram ainda que o limite de conformação é diferente para ensaios no plano e fora deste. Para o mesmo material, foram encontrados limites de conformabilidade até 6% superiores para ensaios fora do plano da amostra (8).

Dentro dos ensaios com as forças aplicadas no plano do provete, são os ensaios de provetes cruciformes sob duas tensões normais os mais relevantes. Para que este tipo de ensaios sejam considerados válidos, é necessário atingir alguns requisitos tais como (9):

- Existência de uma região de tensões uniformes no centro do provete;
- A rutura deve ocorrer na zona central do provete;
- O centro do provete deve permanecer fixo durante o ensaio.

De modo a cumprir os dois primeiros requisitos, têm sido efetuados vários estudos sobre a geometria do provete (10). Os parâmetros mais importantes são a espessura da zona central do provete (Figura 3a), a forma do rebaixo na mesma zona (Figura 3b), o raio de concordância entre braços (Figura 3c) e os rasgos ao longo dos braços (Figura 3d).

Para garantir o último requisito de manter o centro do provete fixo durante os ensaios, os quatro braços do provete têm de ser solicitados, sendo que os braços atuantes segundo o mesmo eixo devem ser solicitados com a mesma velocidade mas em sentidos opostos. Na Figura 4 podem ver-se as diferenças entre solicitar dois dos braços ou os quatro braços do provete (11).

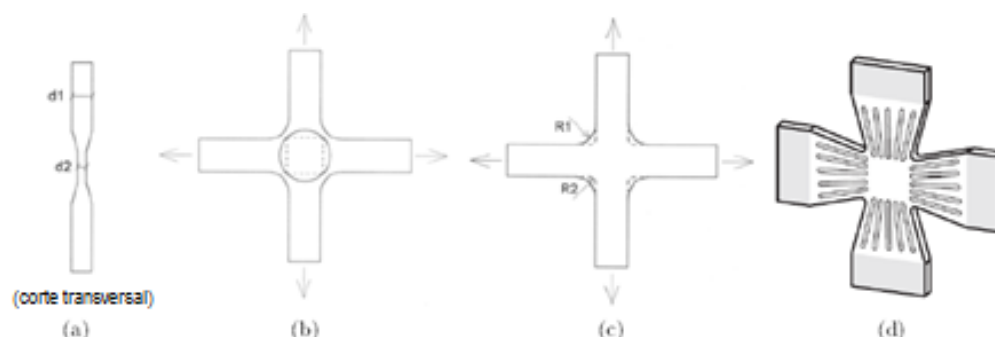


Figura 3- Propostas de geometria dos provetes cruciformes: a), b) e c) (11); d) (5).

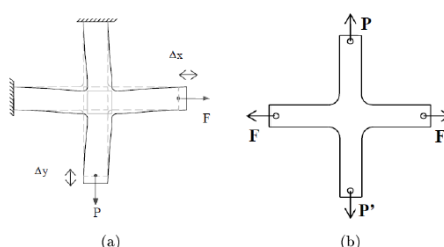


Figura 4- Provette sujeito a solicitação em: a) Dois braços; b) Quatro braços (11).

### 1.3. Máquinas de ensaios biaxiais

Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidas e construídas várias máquinas de ensaios biaxiais. Estas incluem máquinas autónomas e não autónomas. As máquinas autónomas remontam a 1967, ano em que Shiratori e Ikegami (12) criaram um dispositivo com atuadores hidráulicos que proporcionava forças de 50 kN. A Figura 5 apresenta uma máquina desenvolvida por Makinde e outros (13). Esta máquina consiste em dois sistemas principais:

o sistema de carregamento e o sistema de controlo. A carga era fornecida por dois atuadores lineares hidráulicos com capacidade para 250 kN em cada eixo. Foram usados dois atuadores para cada eixo para garantir que o centro do provete permanecia imóvel durante o ensaio. Os atuadores do mesmo eixo estavam ligados a linhas comuns para que exercessem forças iguais mas em sentidos opostos. Foi aplicada uma célula de carga por eixo, para que se conseguisse medir a força em cada eixo durante o ensaio (3).

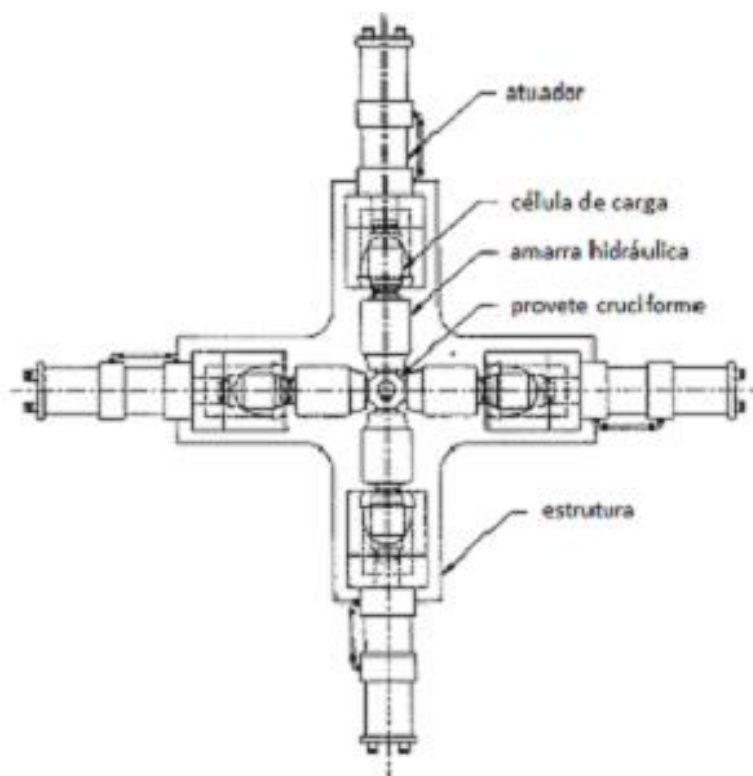


Figura 5- Máquina biaxial de Makinde e outros (imagem adaptada de (13)).

Mais tarde, Boehler e outros (14) desenvolveram outra máquina autónoma de formato octogonal e disposta verticalmente (Figura 6). Esta era acionada por quatro parafusos sem fim. Cada parafuso era controlado por dois motores: um motor DC utilizado durante o ensaio e um motor AC para um posicionamento rápido antes de cada ensaio. Esta máquina permitia variar a velocidade do ensaio entre 0.003 e 0.3 mm/min e a força máxima para cada eixo era de 100 kN. Uma grande vantagem desta máquina era a sua disposição vertical, que facilitava o acesso para a colocação do provete e também permitia uma boa observação do provete para análise da sua deformação. A desvantagem era o peso morto das amarras horizontais que poderiam provocar forças de flexão nos provetes(3).

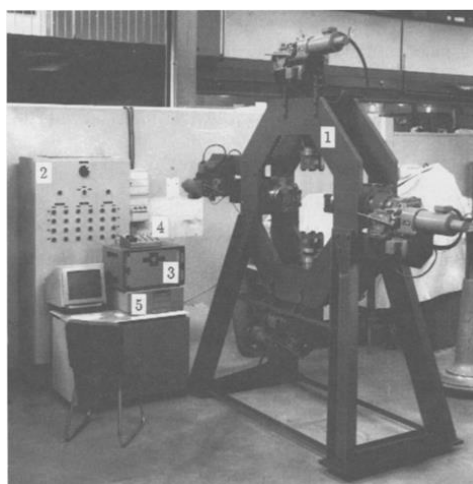


Figura 6- Máquina biaxial de Boehler e outros (14): 1) Estrutura; 2) Unidade de alimentação; 3) Unidade analógica/lógica; 4) Painel de controlo; 5) Unidade de servocontrolo.

Kuwabara e outros (15) desenvolveram uma outra máquina de ensaios biaxiais com o intuito de clarificar experimentalmente o comportamento elástico e plástico de um aço laminado a frio sob tensões biaxiais (Figura 7). Esta era acionada por quatro cilindros hidráulicos. Os cilindros opostos eram ligados a linhas hidráulicas comuns para que os dois exercessem a mesma pressão durante o ensaio. Cada eixo era controlado independentemente, através de servomecanismos. Para garantir que o centro do provete permanecia imóvel, foi implementado um sistema do tipo pantógrafo, que ligava os quatro braços da máquina (3).

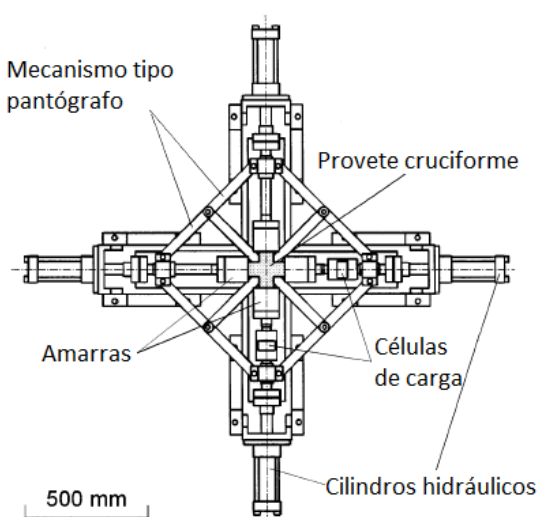


Figura 7 - Máquina biaxial de Kuwabara e outros (imagem adaptada de (15)).



De forma a reduzir os custos associados à construção de máquinas autónomas, foram desenvolvidos acessórios para aplicar em máquinas universais de ensaios, para que estas pudessem efetuar ensaios biaxiais. Um exemplo deste dispositivo foi desenvolvido por Hoferlin e outros (16). Este consistia numa máquina de ensaios de tração uniaxial com um atuador hidráulico removível. A máquina de ensaios uniaxiais fazia o movimento vertical e os acessórios desenvolvidos faziam o movimento horizontal. O dispositivo horizontal era montado sobre rolamentos de baixo atrito, para garantir que a estrutura horizontal permanecia alinhada com o centro do provete durante o ensaio (3).

Outra máquina deste género foi desenvolvida no Instituto Fraunhofer na Alemanha (Figura 8) (3). Esta consistia na conversão do movimento vertical de uma máquina de ensaios de compressão, em movimento horizontal em duas direções diferentes.



Figura 8 - Mecanismo biaxial do Instituto Fraunhofer (3).

Ferron and Makinde (17) desenvolveram outro mecanismo que utilizava uma máquina de ensaios de tração uniaxial (Figura 9). Neste mecanismo, a carga era aplicada nos elementos H1 e H2. Quatro ligações verticais (Av), quatro ligações horizontais (Ah) e os elementos C1 e C2, promoviam o movimento horizontal dos elementos H3 e H4. Este mecanismo foi também utilizado por Terriault e outros (18). A diferença deste dispositivo para o anterior está na utilização de uma máquina de ensaios de tração em vez de compressão e na aplicação da carga aos elementos C1 e C2.

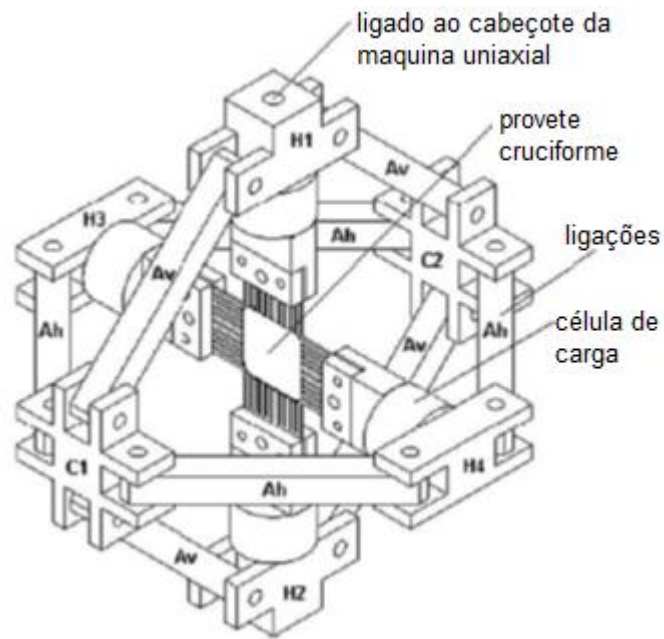


Figura 9 - Mecanismo biaxial de Ferron e Makinde (imagem adaptada de (17)).

Outro exemplo mais simples é o dispositivo desenvolvido na Universidade Tecnológica de Eindhoven (Figura 10) (5). Neste dispositivo é aplicada uma força de compressão entre os elementos 1 e 2. O movimento vertical é transformado em movimento horizontal em duas direções diferentes por meio de tirantes e rótulas. A medição da deformação é feita através da abertura 3, onde é colocado um espelho que permite a observação do centro do provete (5).

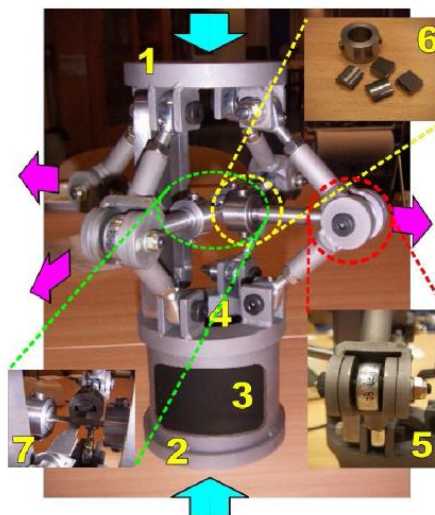


Figura 10 - Mecanismo biaxial da Universidade de Tecnologia de Eindhoven (5).

No Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro foram desenvolvidas duas máquinas de ensaios biaxiais. A primeira tem capacidade para 100 kN e é acionada por um único atuador hidráulico (Figura 11)(20),(21). Esta é capaz de realizar ensaios com combinações diferentes de tração e de compressão, por meio de cunhas que transformam o movimento vertical descendente do atuador em movimento horizontal em duas direções.



Figura 11-Maquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 100 kN (19).

A segunda é uma máquina autónoma com a capacidade máxima de 10 kN (21). Esta foi a máquina utilizada na realização dos ensaios para esta dissertação e encontra-se descrita na secção que se segue.

#### **1.4. Máquina de ensaios biaxiais utilizada**

Os ensaios biaxiais foram efetuados com a máquina de ensaios biaxiais desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (Figura 12) (21). Esta máquina pode realizar ensaios biaxiais de tração-tração, compressão-compressão ou tração-compressão. Pode também fazer ensaios uniaxiais de tração ou de compressão. As especificações da máquina encontram-se descritas na Tabela 1. As suas dimensões gerais podem observar-se na Figura 13.

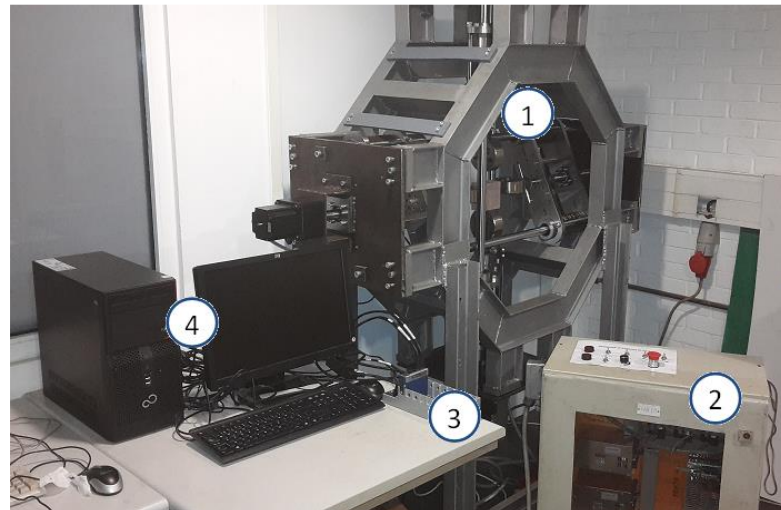


Figura 12 – Máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN: 1) máquina biaxial; 2) quadro elétrico; 3) sistema de aquisição; 4) computador para comando (21).

Tabela 1 – Especificações da máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN (21).

Alimentação	230 VAC			
Potência	1201 W			
Comando	5 VDC			
Peso <sub>aprox</sub>	500 Kg			
Carga Máxima	10 kN			
Curso dos carros [max]	1	2	3	4
	135 mm	110 mm	110 mm	135 mm
Campo visual para o provete	300x300 mm <sup>2</sup>			
Comprimento do provete tração [min-max <sub>após ensaio</sub> ]	120 - 340 mm			
Velocidade de ensaio [min-max]	0- 30 mm/min			
Velocidade do carro (modo manual) [min-max]	0.93 - 93 mm/min			

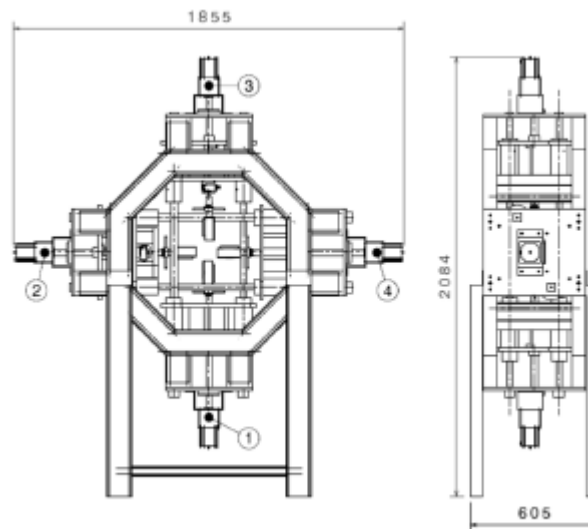


Figura 13 – Dimensões gerais da máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN (21).

A máquina pode ser controlada manualmente, utilizando o painel da Figura 14, ou automaticamente através de uma aplicação desenvolvida em LabView (Figura 15). A máquina é acionada por quatro motores passo a passo que podem ser acionados individualmente no modo manual, sendo que os motores selecionados trabalham todos à tração ou todos à compressão, quando acionados manualmente. No modo automático, os motores são acionados aos pares, isto é, pode ser acionado o par de motores que realiza movimento vertical e o par que realiza o movimento horizontal. Em modo automático, esta máquina permite escolher velocidades diferentes para o eixo vertical e para o eixo horizontal.



Figura 14 – Painel de controlo manual da máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN (21).



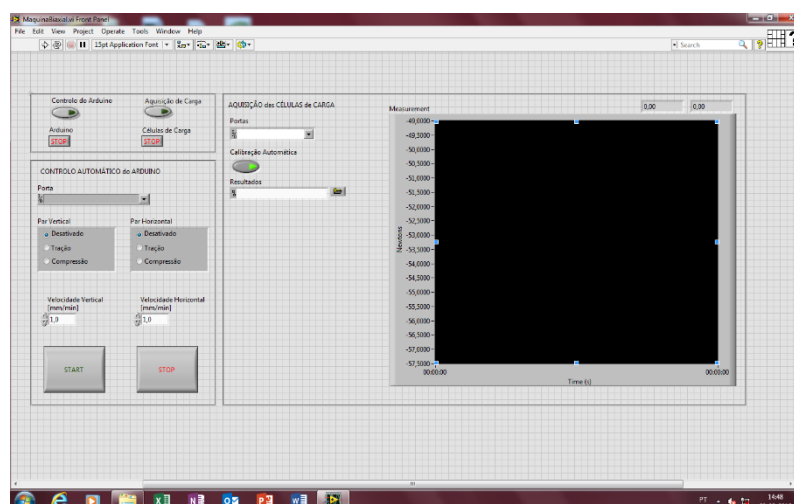


Figura 15 – Aplicação em LabView da máquina biaxial do DEM-UA com capacidade para 10 kN.

## 1.5. Correlação digital de imagem

As deformações biaxiais foram obtidas utilizando um sistema ótico 3D sem contacto baseado em correlação digital de imagem. O sistema utilizado foi o ARAMIS 5M LT (base ajustável) da empresa GOM (Figura 16). O ARAMIS reconhece a estrutura superficial do objeto a medir em imagens digitais e atribui coordenadas para os pixéis da imagem. A primeira imagem do projeto de medição representa o estado não deformado do objeto. Após ou durante a deformação do objeto são adicionadas imagens. Posteriormente, o ARAMIS compara as imagens e calcula os deslocamentos e deformação do objeto (22).



Figura 16 – O sistema de correlação digital de imagem ARAMIS 5M LT.

A correlação digital de imagem é uma técnica que poderá vir a ser ideal para o estudo da propagação de fenda e deformação de materiais em aplicações do mundo real. Além disso, tem potencial para se tornar uma solução de baixo custo, simples e de grande precisão(23). Uma vez que este método não precisa de um sistema ótico muito complicado, as medições podem ser feitas com relativa facilidade (24).

### 1.5.1. Correlação digital de imagem 2D

Em correlação de imagem digital a duas dimensões, os deslocamentos são diretamente detetados a partir da observação da superfície da amostra(24). A Figura 17 representa um exemplo típico da sua configuração.

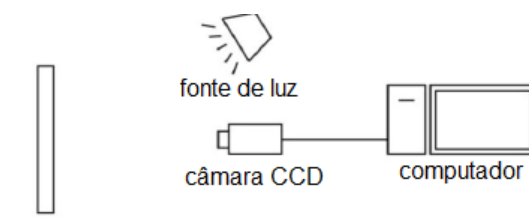


Figura 17 – Exemplo de configuração de sistema de correlação de imagem 2D (imagem adaptada de (24)).

As imagens da superfície plana da amostra são normalmente obtidas através de uma câmara CCD e depois guardadas num computador. Essas imagens são então comparadas para determinar deslocamentos encontrando pontos coincidentes de uma imagem para outra. Neste processo é necessário utilizar uma área com múltiplos pixéis (tal como 20x20 pixéis) porque é quase impossível identificar pontos coincidentes utilizando apenas um pixel. Esta área, normalmente designada por subconjunto, tem uma distribuição de intensidade luminosa (nível de cinzento) única dentro de si mesma. É assumido que a distribuição de intensidade luminosa não se altera durante a deformação (24). Na Figura 18 pode-se ver parte de uma imagem antes e depois da deformação.



Figura 18 – Exemplo de imagem antes e depois da deformação (imagem adaptada de (24)).

O subconjunto antes da deformação é encontrado na imagem depois da deformação procurando a área que tenha a mesma distribuição de níveis de cinzento que o subconjunto inicial. Uma vez encontrado o subconjunto na imagem deformada, é possível saber qual foi o seu deslocamento. Para que o software utilizado não confunda subconjuntos, é necessário que a superfície da amostra tenha uma distribuição de níveis de cinzento muito variada. Se a superfície da amostra não apresentar esta condição, é necessário aplicar um padrão artificial aleatório, e para isso é utilizada tinta *spray* (24). Na Figura 19 pode observar-se um exemplo típico de um padrão artificial aleatório na superfície de uma amostra.



Figura 19 – Exemplo típico de padrão artificial aleatório (24).

### 1.5.2. Correlação digital de imagem 3D

A correlação de imagem a três dimensões utiliza imagens obtidas simultaneamente a partir de duas câmaras digitais, de forma a obter os campos completos de deslocamento e



deformação de uma dada estrutura. Isto é conseguido através da utilização do princípio da visão estéreo e triangulação, em conjunto com correlação digital de imagem a duas dimensões (25). Os conceitos de cada um são explicados em detalhe por Bruck e outros (26). Em resumo, o método de visão estéreo assume a posição relativa entre as duas câmaras obtida através da calibração, sendo esta constante durante o ensaio(25). Através da observação de um ponto comum com as duas câmaras, a localização desse ponto pode ser triangulada no espaço tridimensional (25). Na Figura 20 pode observar-se uma representação gráfica deste método.

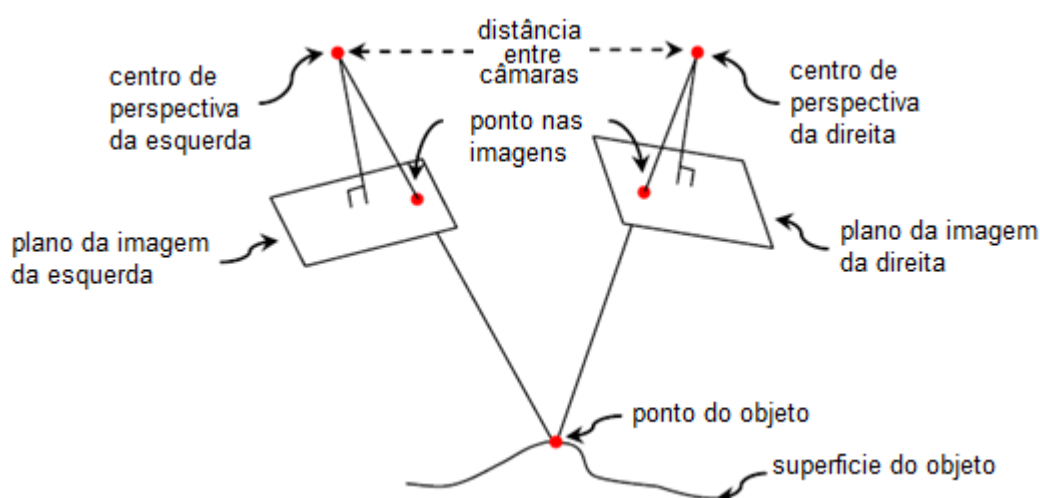


Figura 20 – Representação gráfica de um sistema de visão estéreo (imagem adaptada de (25)).

A calibração é um processo essencial neste método, que consiste na determinação dos parâmetros extrínsecos (a posição relativa e orientação dos sistemas de coordenadas relativos das duas câmaras) e intrínsecos (distância focal, ponto principal, distorção das lentes, etc.).

### 1.6. Sensibilidade dos polímeros à taxa de deformação

É bem sabido que o comportamento mecânico dos polímeros é sensível à taxa de deformação. Na Figura 21 podemos ver as curvas tensão-deformação de três ensaios de tração em polipropileno, realizados à mesma temperatura, mas com taxas de deformação diferentes. As taxas de deformação são indicadas pelas velocidades a que as extremidades dos provetes foram tracionadas (27).

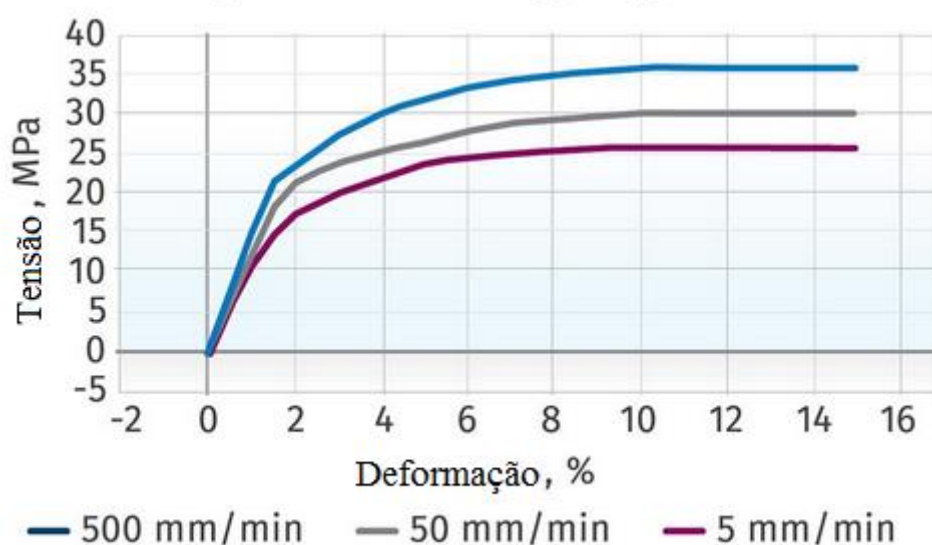


Figura 21 - Curvas tensão-deformação de polipropileno medidas em (27).

À medida que a velocidade aumenta, o módulo de elasticidade, a tensão de cedência e a tensão de rutura também aumentam. Este efeito pode também ser conseguido se se mantiver a taxa de deformação constante e se se reduzir a temperatura (27).

Outro aspeto importante do comportamento dos plásticos é o facto da extensão de rutura diminuir com o aumento da taxa de deformação. Na Figura 21 não é possível ver as curvas completas de tensão-deformação dos ensaios, mas foi observado que a deformação máxima para o ensaio a 5 mm/min foi superior a 300%, enquanto que a 50 mm/min a rutura se deu aos 125% e para 500 mm/min o material apenas apresentou 30% de deformação (27).

## **2. Procedimento experimental**



## 2.1. Provete ensaiados

O material utilizado foi o polipropileno (PP), polímero termoplástico reciclável cujas propriedades são dadas no anexo 1, tendo sido escolhido pelo seu baixo custo, boa maquinabilidade e baixa rigidez, que facilita a medição das deformações numa zona central relativamente pequena onde é suposto dar-se a rutura (19). Os provetes foram obtidos de uma chapa de 5 mm de espessura, recorrendo à serra de fita e ao centro de maquinagem CNC do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Foram fabricados provetes para ensaios de tração uniaxial (Figura 22) e provetes cruciformes para ensaios biaxiais tração-tração (Figura 23).

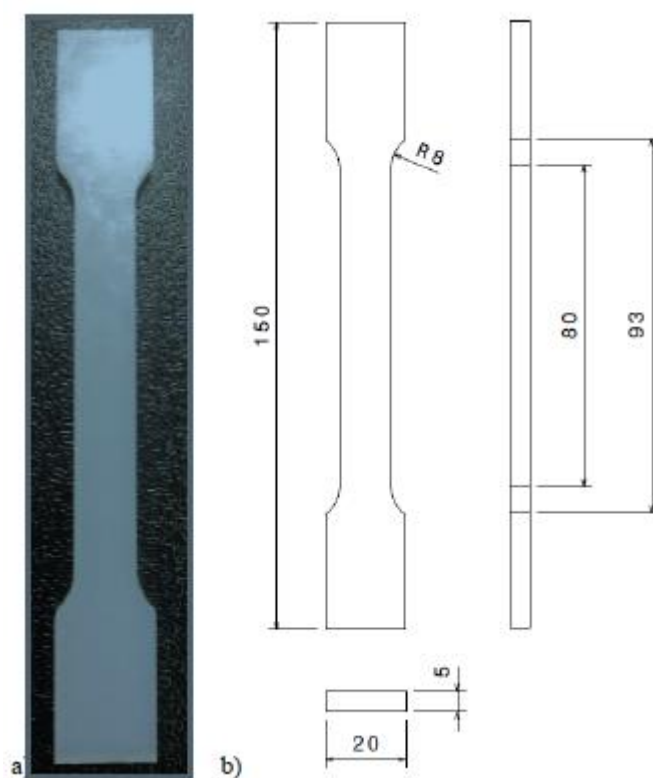


Figura 22 - Provete para ensaios de tração uniaxial: a) fotografia, b) desenho.

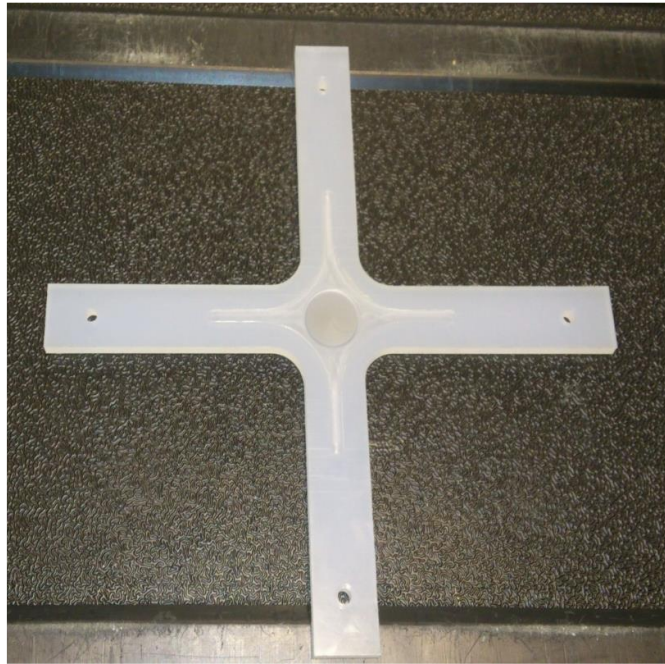


Figura 23 - Fotografia de um provete cruciforme para ensaios biaxiais de tração-tração.

A geometria dos provetes cruciformes (Figura 24) foi desenvolvida a partir de estudos numéricos noutra dissertação (28). Os provetes têm uma espessura reduzida na sua zona central com o intuito de aumentar localmente as tensões e promover a rutura nessa zona onde é feita a medição.

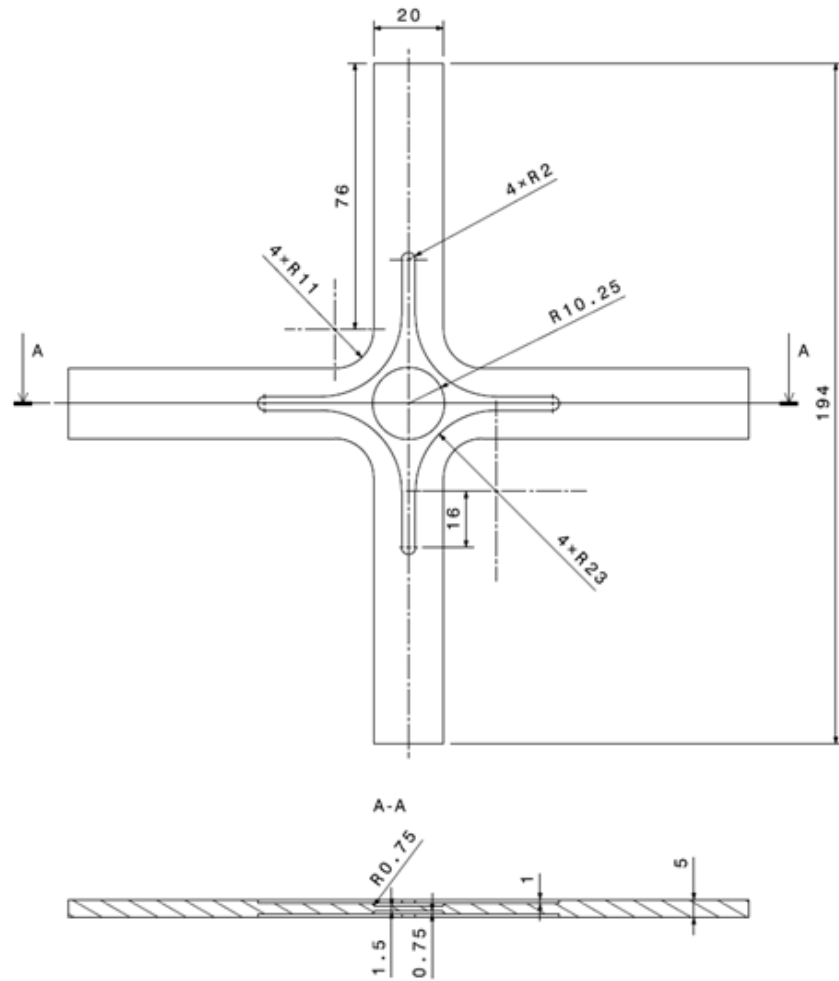


Figura 24 – Desenho dos provetes cruciformes.

## 2.2. Ensaio uniaxiais

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados na máquina universal Shimadzu 50 kN-AG (Figura 25).



Figura 25 – Máquina universal Shimadzu 50 kN-AG.

Estes ensaios foram realizados a 3 velocidades diferentes: 4 mm/min, 40 mm/min e 400 mm/min. Estas são as velocidades a que se movimenta a amarra da máquina, e a cada velocidade está associada uma taxa de deformação. Esta taxa de deformação pode ser calculada através da equação (29)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l_0} \quad (2.1)$$

onde  $v$  é a velocidade da máquina e  $l_0$  é o comprimento da zona deformável do provete. Considerou-se que a zona deformável do provete é todo o provete exceto a zona de amarração, sendo o seu comprimento de 80 mm.

### **2.2.1. Preparação dos provetes**

Para a medição das deformações dos ensaios uniaxiais, foi utilizado o vídeo-extensómetro Messphysic ME 46 NG (Figura 26). Para que este possa efetuar medidas rigorosas das deformações, são necessárias marcas óticas de alto contraste. Para este efeito, foram colocadas marcas retangulares. Estas marcas foram colocadas em torno do centro do provete,



a 50 mm uma da outra, sendo esta medida o comprimento de referência. Nestas marcas, uma das suas faces transversais deve ser o mais retilínea possível, para que o *software* do vídeo-extensómetro a consiga identificar, e devem ser colocadas com um ângulo de 5°, que se pode ver na Figura 27.



Figura 26 - Vídeo-extensómetro Messphysik ME 46 NG.

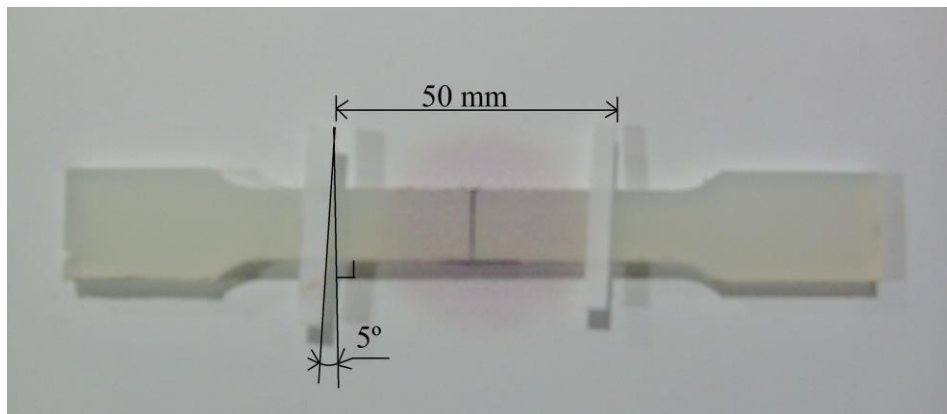


Figura 27 – Provete para ensaios uniaxiais com marcas óticas retangulares.

Na Figura 28 pode ver-se o *setup* utilizado durante os ensaios uniaxiais. O provete é iluminado por trás, para que exista uma zona de sombra onde deve haver um claro contraste entre fundo a branco (iluminado) e o provete com as marcas (zona escura não iluminada). Este contraste é necessário para o funcionamento do *software* associado ao vídeo-extensómetro.

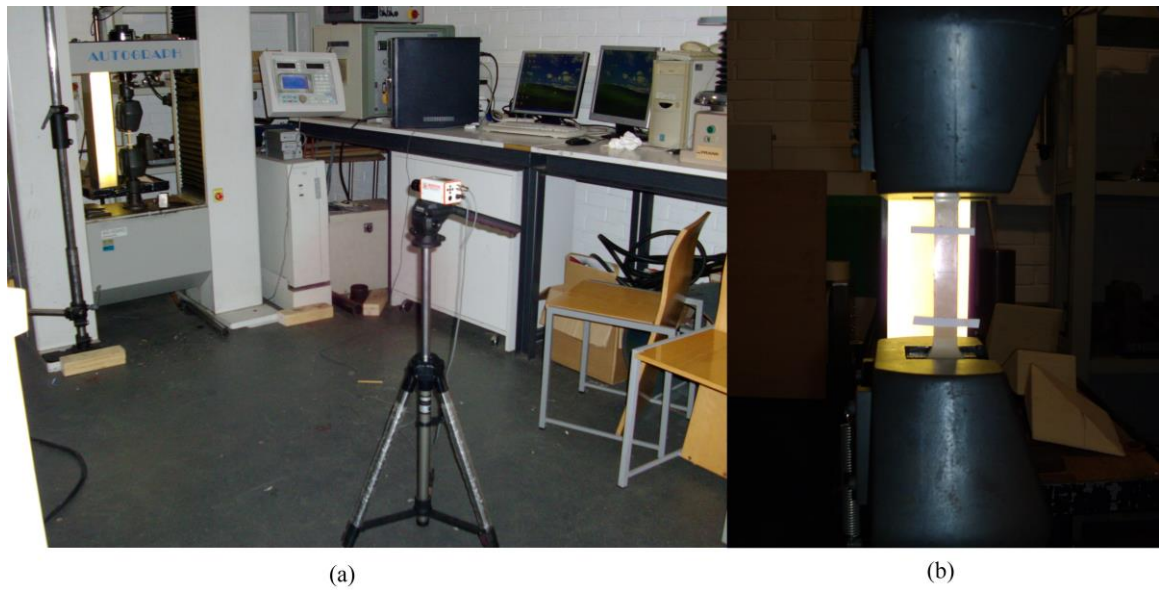


Figura 28 – *Setup* dos ensaios uniaxiais: a) vista geral; b) pormenor do provete.

### 2.2.2. Tratamento de dados

As tensões convencionais

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

foram calculadas a partir da força medida e da área inicial  $A_0$  da secção do provete.

A extensão convencional

$$\epsilon_c = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.3)$$

foi obtida a partir da variação da distância  $\Delta l$  entre as marcas óticas retangulares colocadas no provete e da distância inicial  $l_0$  entre as mesmas. Calculou-se depois a extensão real

$$\epsilon_r = \ln(1 + \epsilon_c) \quad (2.4)$$

## 2.3. Ensaaios Biaxiais

Foram realizados ensaios biaxiais com duas velocidades diferentes nos eixos  $x$  e  $y$  da máquina: 1 mm/min e 10 mm/min. Estas velocidades foram calculadas utilizando a equação (2.1), de forma a obter as mesmas taxas de deformação em cada eixo dos ensaios uniaxiais, realizados às velocidades de 4 mm/min e 40 mm/min. Neste caso, considerou-se que a zona do provete que se deformava era sobretudo a zona central de menor espessura. Esta tinha um diâmetro de 20,5 mm, e por isso usou-se  $l_0 = 20,5$  mm na equação (2.1).

### 2.3.1. Preparação dos provetes

Na medição das extensões nos ensaios biaxiais foi utilizado o ARAMIS. Como foi anteriormente referido, para que o software do ARAMIS funcione adequadamente, é necessário que a superfície da amostra a medir tenha uma distribuição de níveis de cinzento muito variada. Para garantir essa distribuição de níveis de cinzento, os provetes foram pintados com *spray* na sua zona central. Inicialmente foram pintados uniformemente de branco e de seguida foi aplicado um padrão utilizando o *spray* preto (Figura 29). Segundo o manual de utilização do ARAMIS (Figura 30), o padrão a utilizar depende da dimensão da zona da amostra a medir. Para amostras de maior dimensão, o padrão pode ser mais grosseiro. O padrão fica mais grosseiro ou mais refinado dependendo da distância a que se aplica o *spray* preto, isto é, quanto maior for a distância a que se aplica o *spray*, mais refinado fica o padrão. Na Figura 31 pode ver-se um dos provetes já pintado.



Figura 29 – Pintura dos provetes

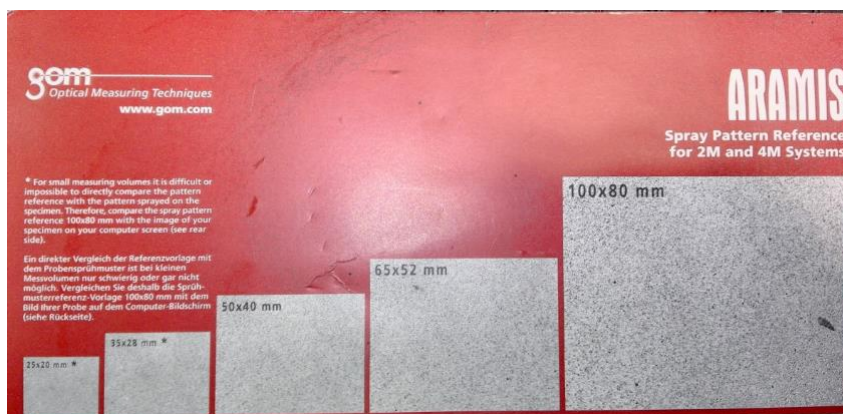


Figura 30 – Padrões a utilizar (22).

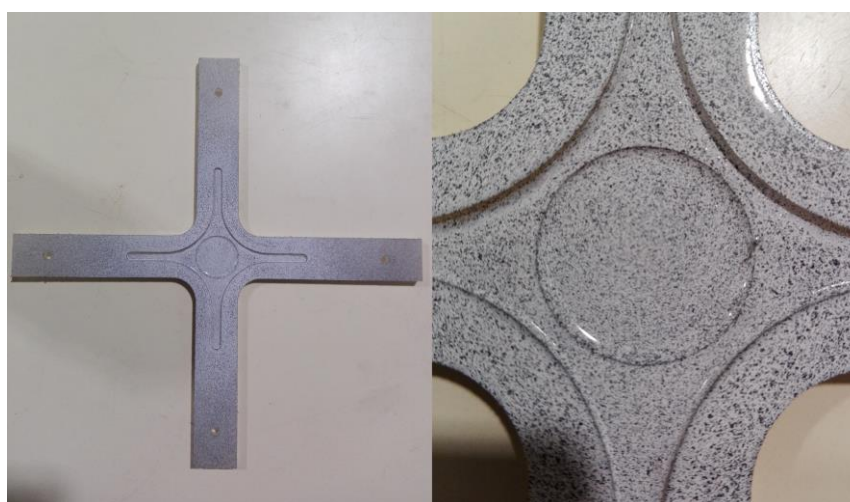


Figura 31 – Fotografia de um provete já pintado.

### 2.3.2. Preparação da máquina de ensaios biaxiais

Na realização dos ensaios biaxiais, são necessários alguns procedimentos para garantir a validade dos ensaios, sendo um dos mais importantes a centragem das amarras da máquina. Este procedimento é essencial para garantir que o provete é tracionado com a razão de velocidades pretendida. Para isso, é utilizado um bloco disponível que tem linhas desenhadas nos seus eixos vertical e horizontal (Figura 32). Este é colocado na amarra inferior, com a linha vertical alinhada com o centro da amarra. Depois, com a máquina em modo manual, o motor da amarra inferior é acionado até que a linha horizontal do bloco esteja alinhada com o centro das amarras que fazem o movimento horizontal. De seguida, vão-se acionando os restantes motores, até que todas as amarras toquem no bloco (Figura 32). Finalmente, são ativados todos os motores ao mesmo tempo em tração, até que o bloco fique solto para o retirar. As amarras ficaram deste modo alinhadas e, até ao início do ensaio, os motores devem ser acionados todos ao mesmo tempo, para que não se perca o alinhamento.

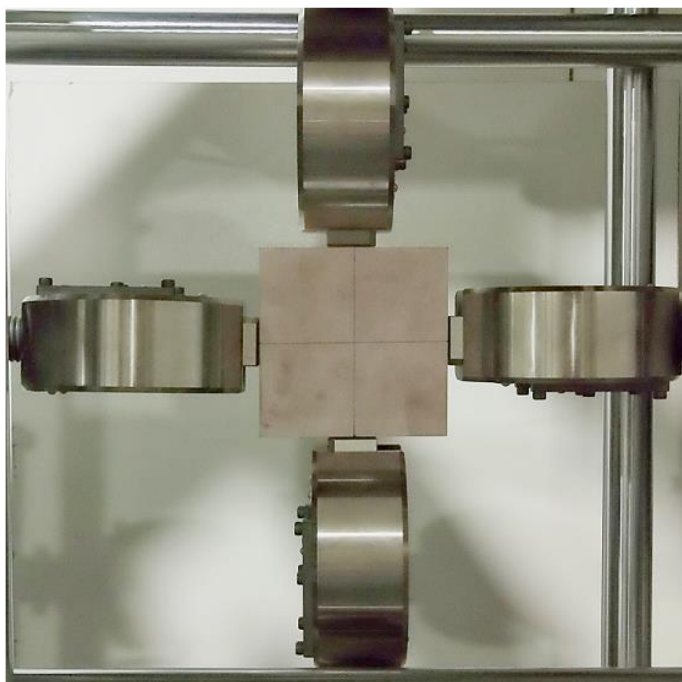


Figura 32 – Máquina biaxial com amarras centradas

O provete é colocado inicialmente na máquina da forma que se encontra descrita na figura 33 e amarrado apenas pelas amarras superior e esquerda. É então ligado o sistema de

aquisição de carga e depois amarradas as restantes pontas do provete. Caso se verifique a existência de pré-cargas, estas devem ser eliminadas, acionando os motores em modo manual até que as cargas fiquem nulas. Neste ponto a máquina de ensaios biaxiais está pronta para iniciar o ensaio. Uma descrição mais detalhada do funcionamento desta máquina pode ser encontrada noutra dissertação (21). Na figura 34 pode ver-se o provete colocado na máquina.

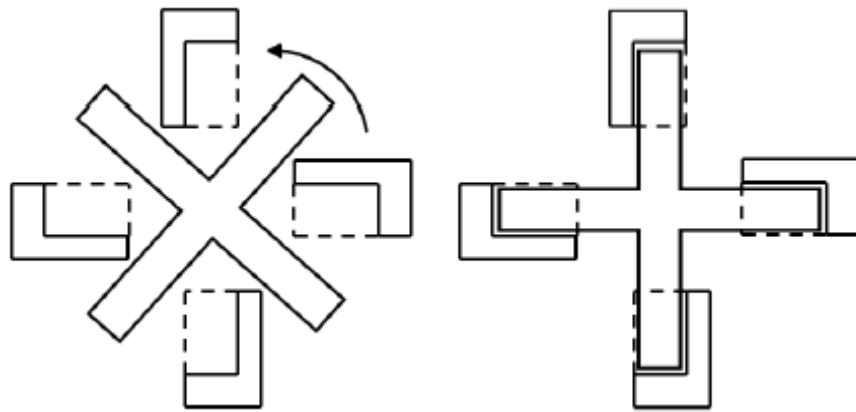


Figura 33 – Esquema da colocação do provete na máquina biaxial (21)

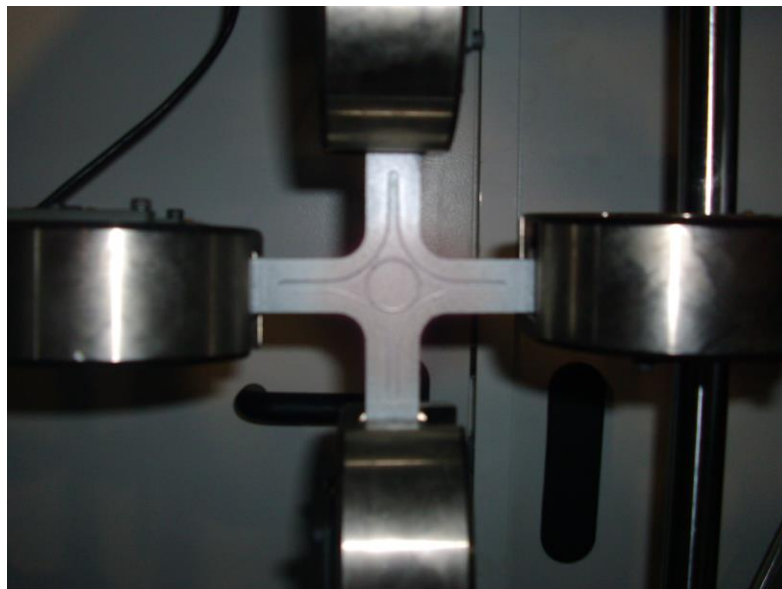


Figura 34 – Provete colocado na máquina biaxial.



### 2.3.3. Preparação do sistema de medição de deformações

O ARAMIS tem na sua constituição duas câmaras, um laser e dois projetores de luz, entre outros. Para a sua correta utilização são necessários alguns procedimentos iniciais, o *setup* das câmaras, da iluminação e a sua calibração. O *setup* das câmaras consiste em alinhar as duas câmaras com o ponto laser emitido para que estas foquem no mesmo ponto do provete. O provete deve também ser iluminado de forma uniforme, ajustando os dois focos de luz. A calibração é um ponto muito importante na preparação do ARAMIS. É feita utilizando um cubo de calibração, que é colocado à mesma distância à qual se vai encontrar o provete, que vai ser fotografado numa sequência de posições pedidas pelo *software*. Se a calibração não for correta, as coordenadas atribuídas aos pontos da imagem de uma câmara são diferentes das da imagem da outra, o que torna impossível tratar os dados. Estes procedimentos iniciais encontram-se descritos detalhadamente em anexo.

### 2.3.4. Tratamento de dados

Nos ensaios biaxiais, foram calculadas tensões aparentes exercidas nos eixos  $x$  e  $y$ , uma vez que a determinação das tensões reais exige modelos numéricos que são desenvolvidos noutra dissertação (28). A tensão aparente segundo o eixo  $x$  foi calculada a partir de

$$\sigma_{AP,x} = \frac{F_x}{A_{AP,x}} \quad (2.5)$$

em que  $F_x$  é a força exercida no eixo  $x$  e  $A_{AP,x}$  é a área aparente definida pelo corte A-A representado na figura 35. A tensão aparente segundo o eixo  $y$  foi calculada de forma análoga.

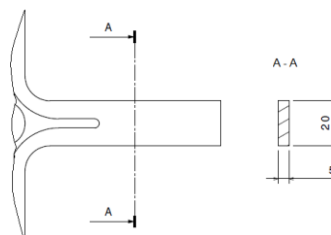


Figura 35 - Área aparente sob tensão no eixo  $x$  durante o ensaio biaxial.

Calculou-se também a tensão de von Mises aparente (30)

$$\sigma_{AP,VM} = \sqrt{\sigma_{AP,x}^2 - \sigma_{AP,x}\sigma_{AP,y} + \sigma_{AP,y}^2} \quad (2.6)$$

Por seu turno, as extensões foram todas calculadas pelo *software* ARAMIS v6.3.1 64bit.



### **3. Resultados e discussão**



### 3.1. Ensaaios Uniaxiais

Na Figura 36 estão representadas as partes iniciais das curvas de tensão-deformação real medidas nos ensaios uniaxiais. Pode-se observar um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da velocidade do ensaio. A Tabela 2 apresenta os valores médios dos módulos de elasticidade para cada velocidade, bem como os seus desvios padrão relativos.

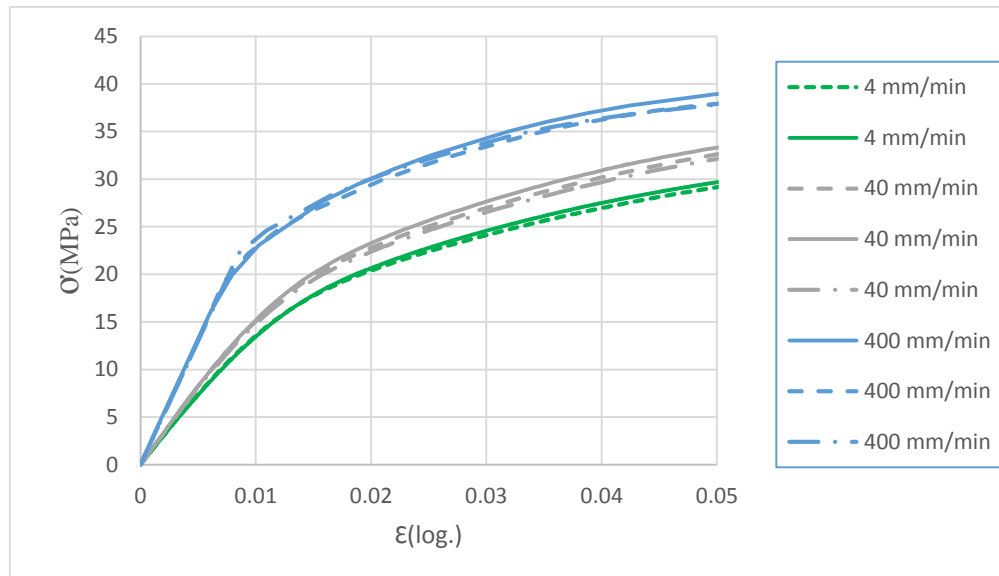


Figura 36 – Fases iniciais das curvas tensão – deformação real dos ensaios uniaxiais.

Tabela 2 – Módulos de elasticidade medidos nos ensaios uniaxiais

Velocidade do ensaio (mm/min)	Média do módulo de elasticidade (GPa)	Desvio padrão relativo (%)
4	1.51	2.61
40	1.68	2.83
400	2.63	16.14

A Figura 37 apresenta as curvas tensão-deformação real completas, sendo possível verificar que a tensão de rutura também aumenta com o aumento da velocidade do ensaio. Na Tabela 3 apresenta-se as médias das tensões de rutura para cada velocidade, bem como os seus

desvios padrão relativos. Na Figura 37 também é possível verificar que as extensões máximas atingidas aumentam com a diminuição da velocidade do ensaio. Nos ensaios a 4 mm/min não se deu a rutura. Os ensaios foram interrompidos devido à sua longa duração e porque já se tinha verificado o que se pretendia, isto é, que as extensões ultrapassavam as extensões máximas atingidas nos ensaios mais rápidos.

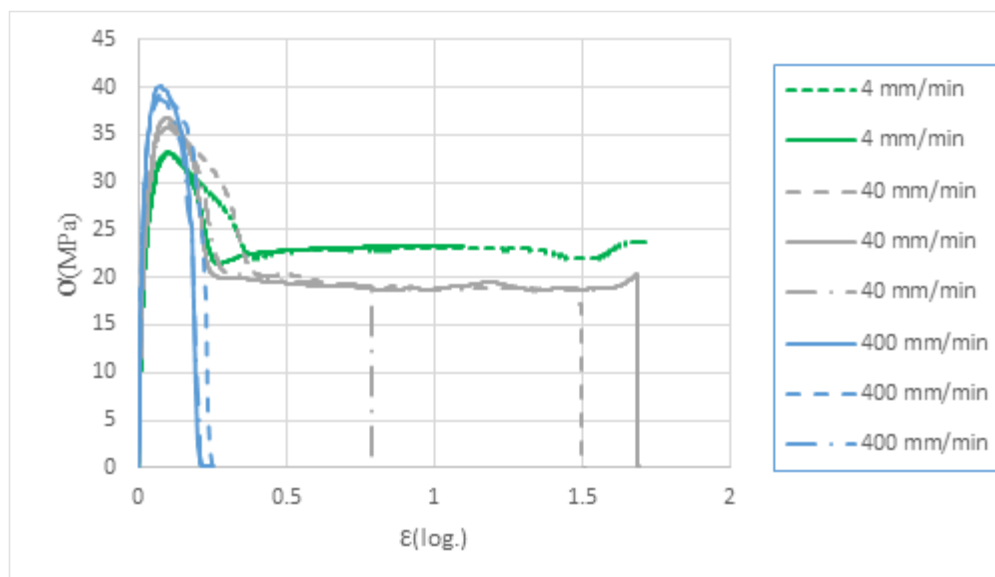


Figura 37 – Curvas tensão-deformação real completas medidas nos ensaios uniaxiais

Tabela 3 – Médias das tensões de rutura nos ensaios uniaxiais.

<b>Velocidade do ensaio (mm/min)</b>	<b>Tensão de rutura (MPa)</b>	<b>Desvio padrão relativo (%)</b>
<b>4</b>	32.96	0.60
<b>40</b>	36.18	1.43
<b>400</b>	39.33	1.65

O incremento no módulo de elasticidade e na tensão de rutura com o aumento da velocidade eram esperados, uma vez que, como é descrito na revisão bibliográfica anterior, isso verifica-

se na maior parte dos materiais poliméricos. Da mesma forma, era esperado também o aumento da extensão de rutura com a diminuição da velocidade do ensaio.

### 3.2. Ensaaios biaxiais

Nas Figuras 38 a 40 são apresentadas imagens obtidas do ARAMIS em vários estágios do ensaio, e que mostram a evolução das extensões  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_{VM}$  na zona central do provete ao longo do ensaio a 10 mm/min.

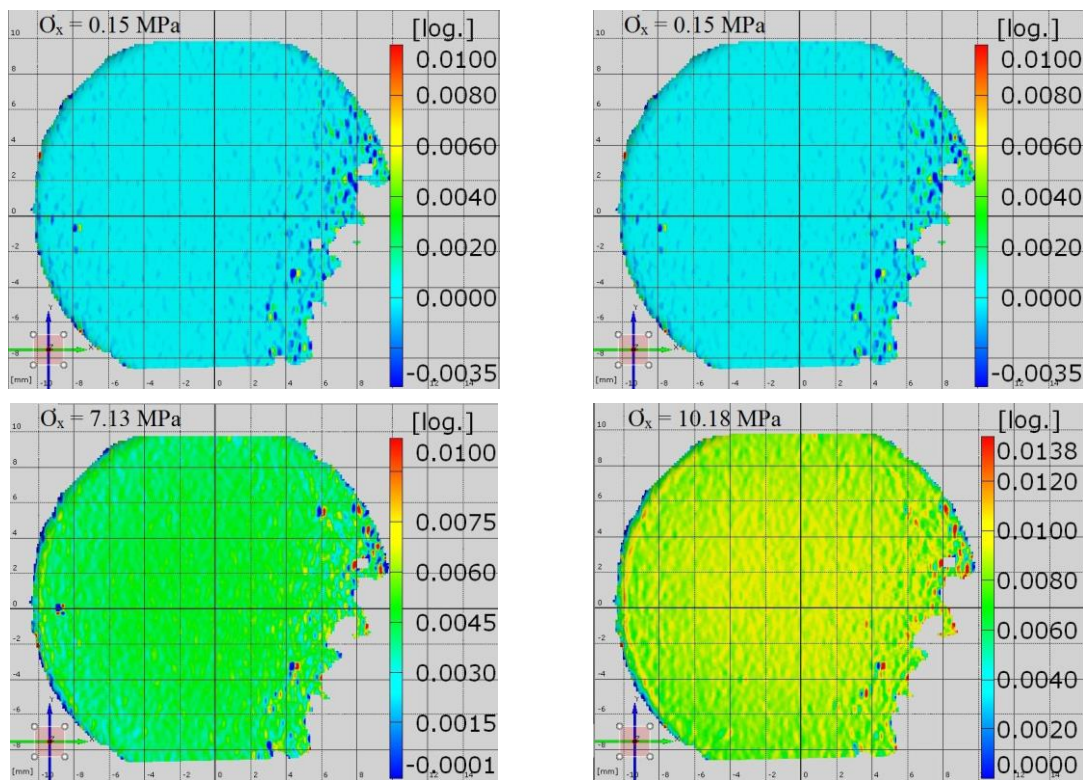


Figura 38 - Extensão  $\varepsilon_x$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,x}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min.

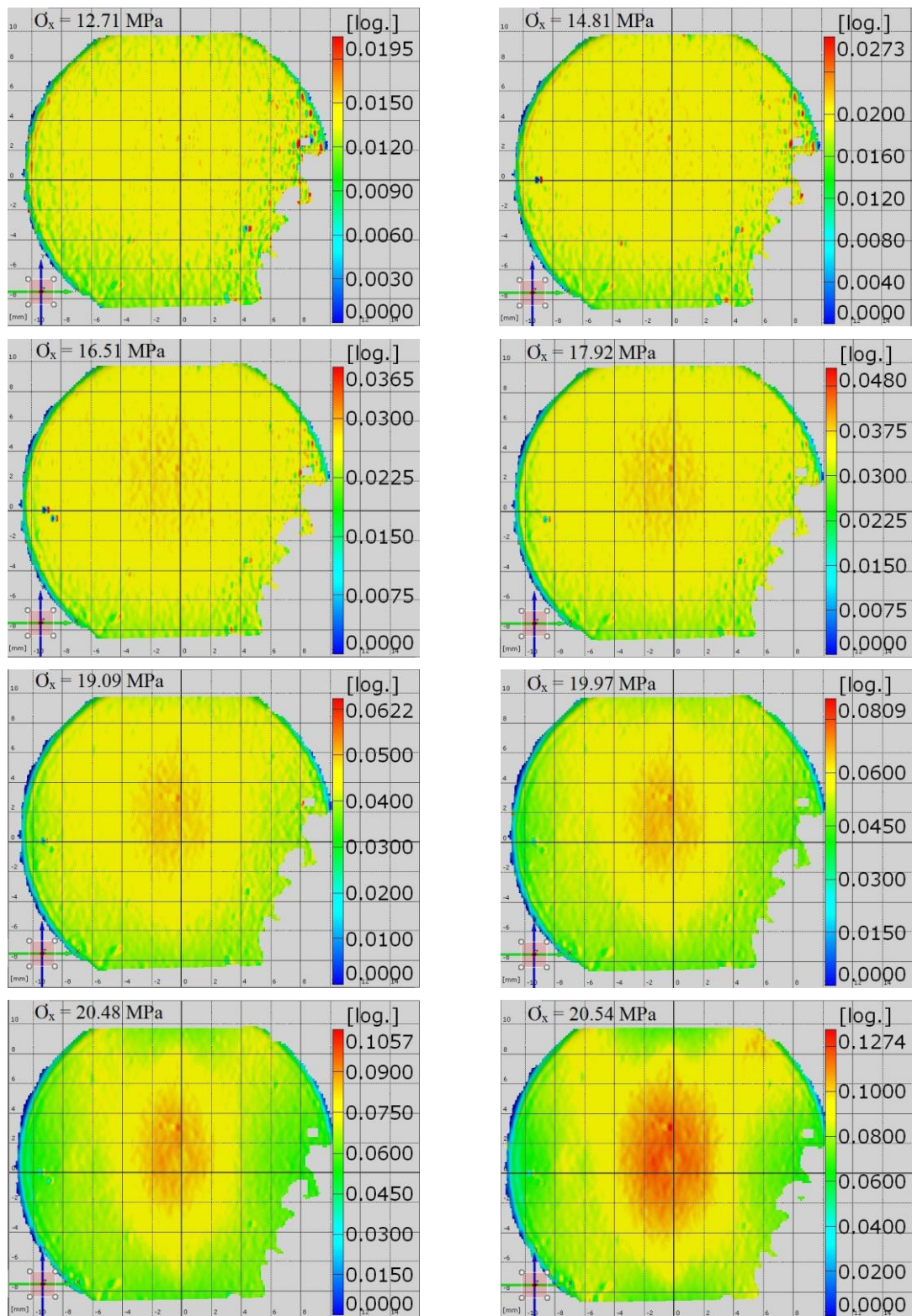


Figura 38 - Extensão  $\epsilon_x$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,x}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação).



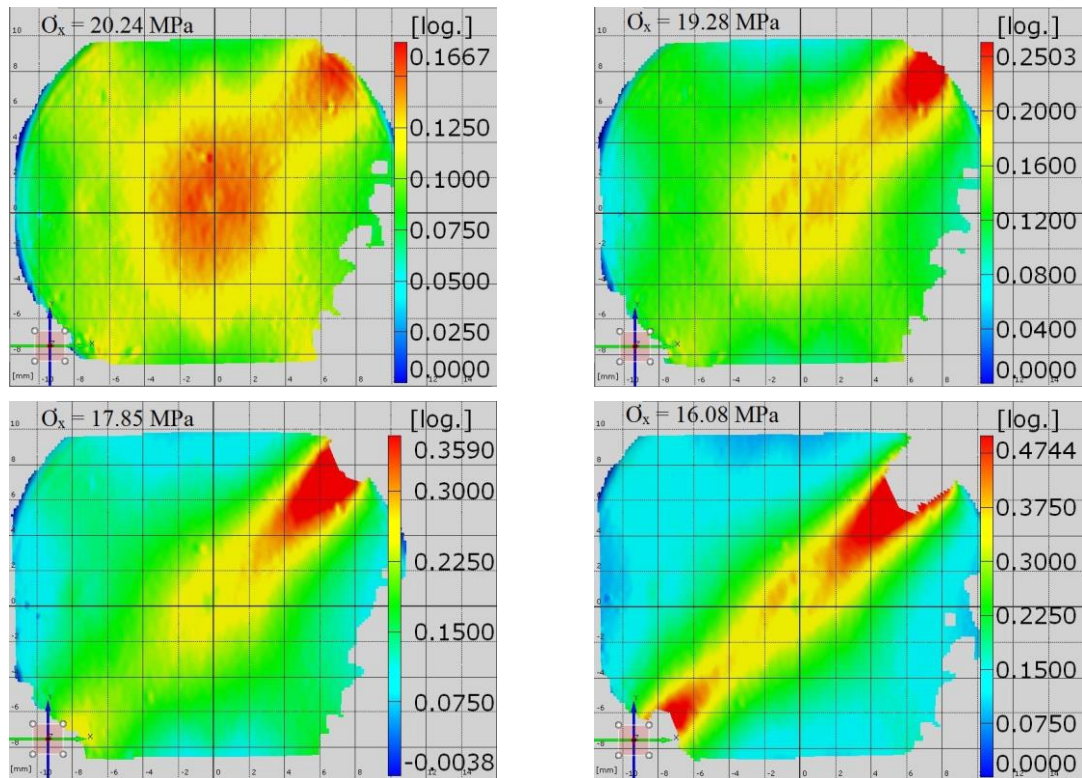


Figura 38 - Extensão  $\varepsilon_x$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,x}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação).

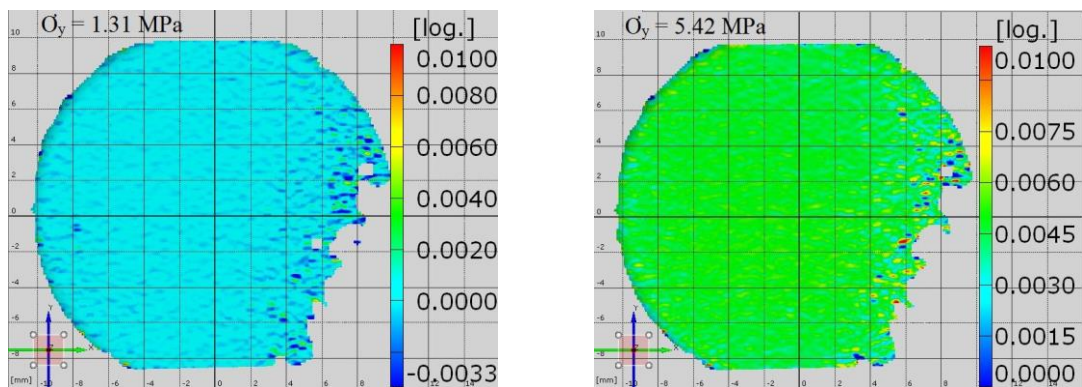


Figura 39 - Extensão  $\varepsilon_y$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,y}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min.

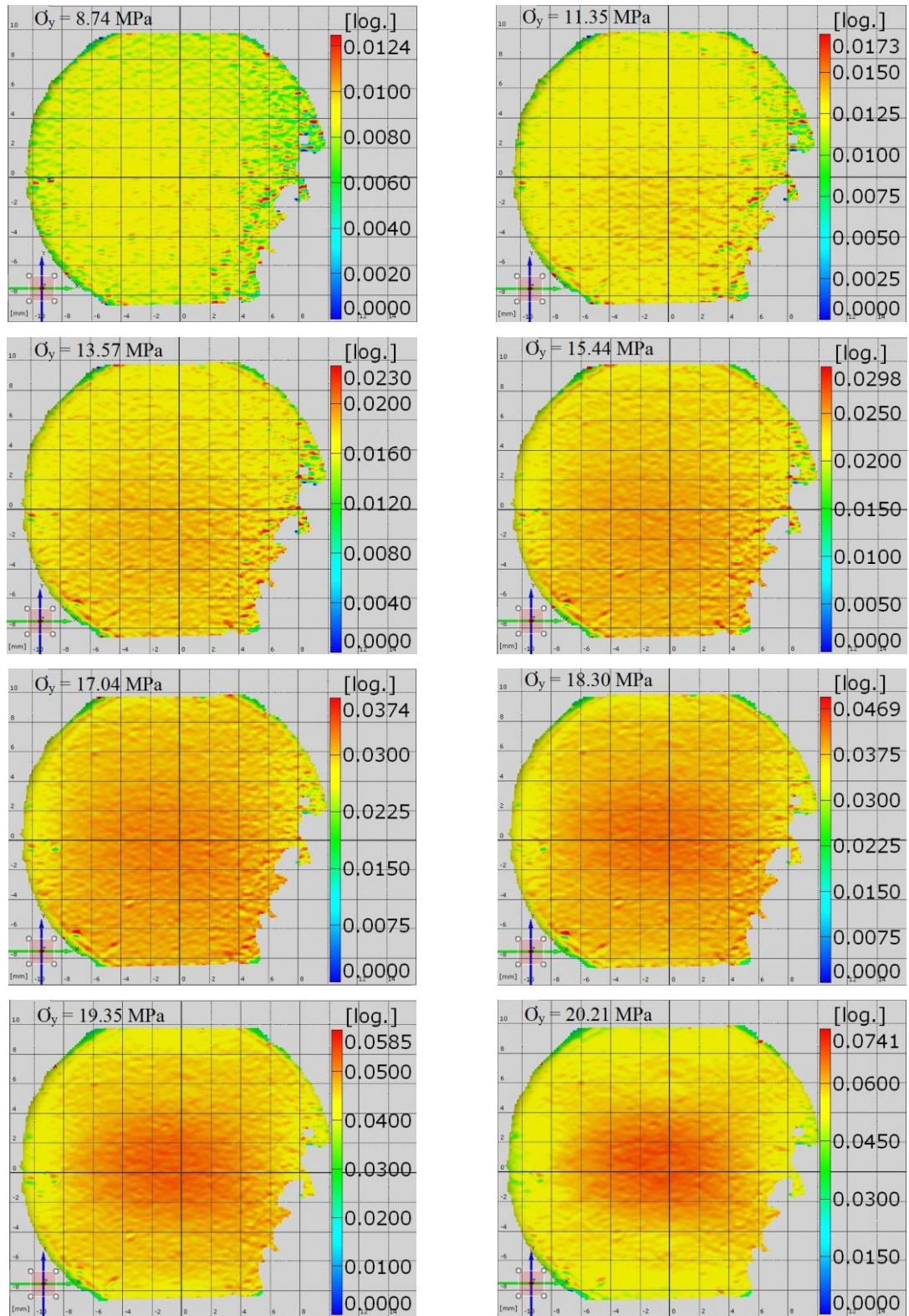


Figura 39 - Extensão  $\varepsilon_y$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,y}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação).



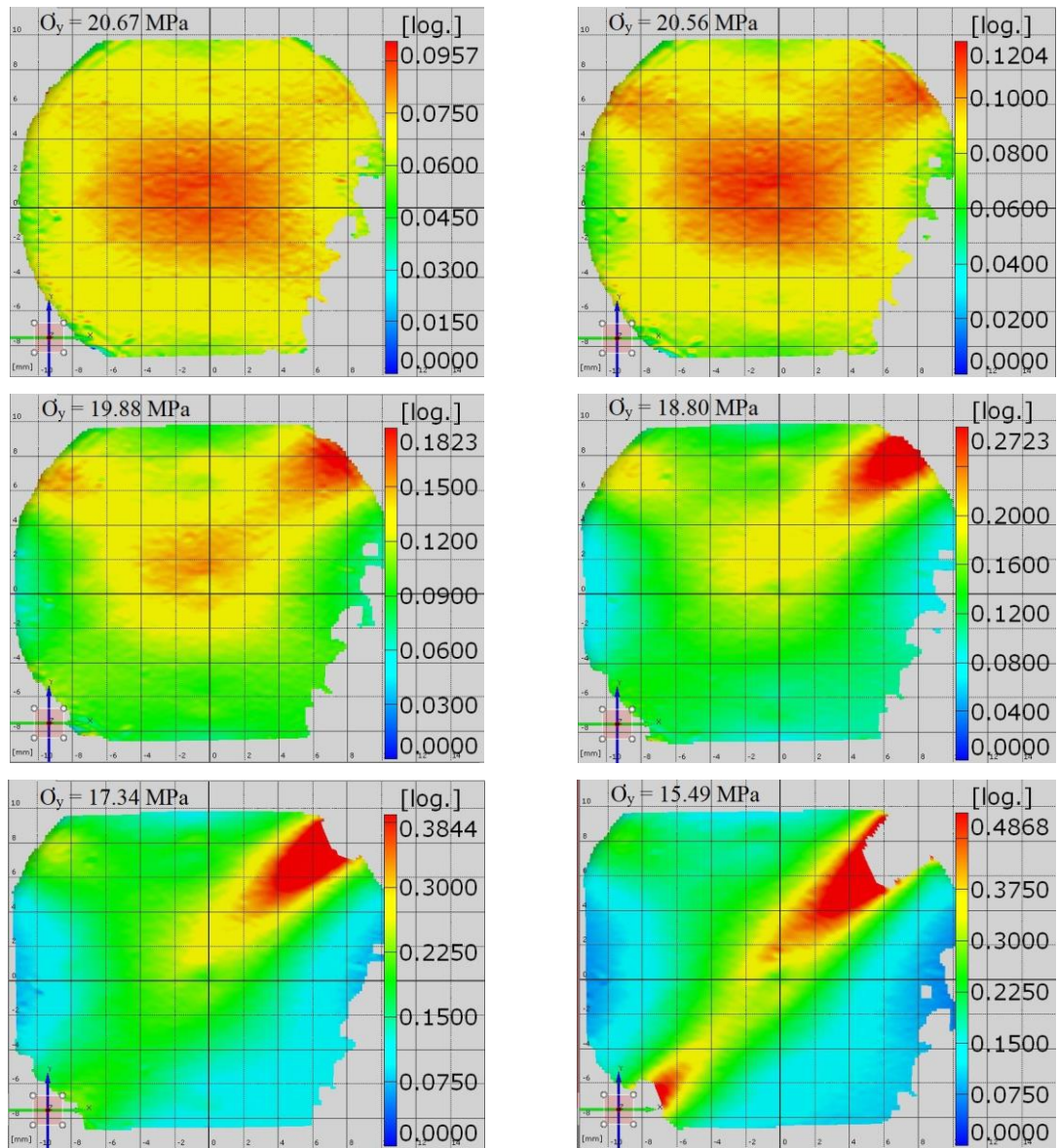


Figura 39 - Extensão  $\varepsilon_y$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,y}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação).

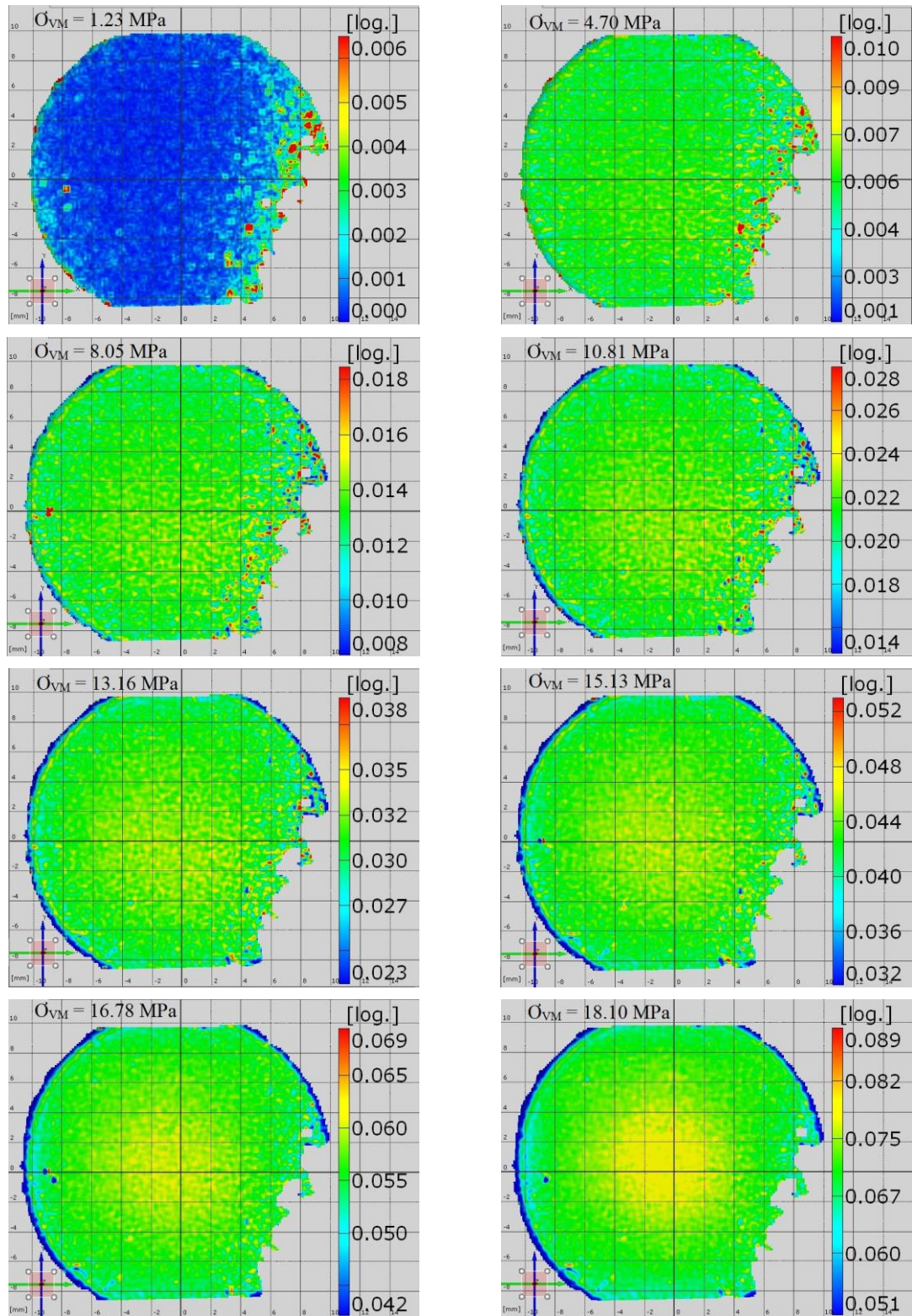


Figura 40 - Extensão equivalente de von Mises em função da tensão aparente  $\sigma_{AP, VM}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min.



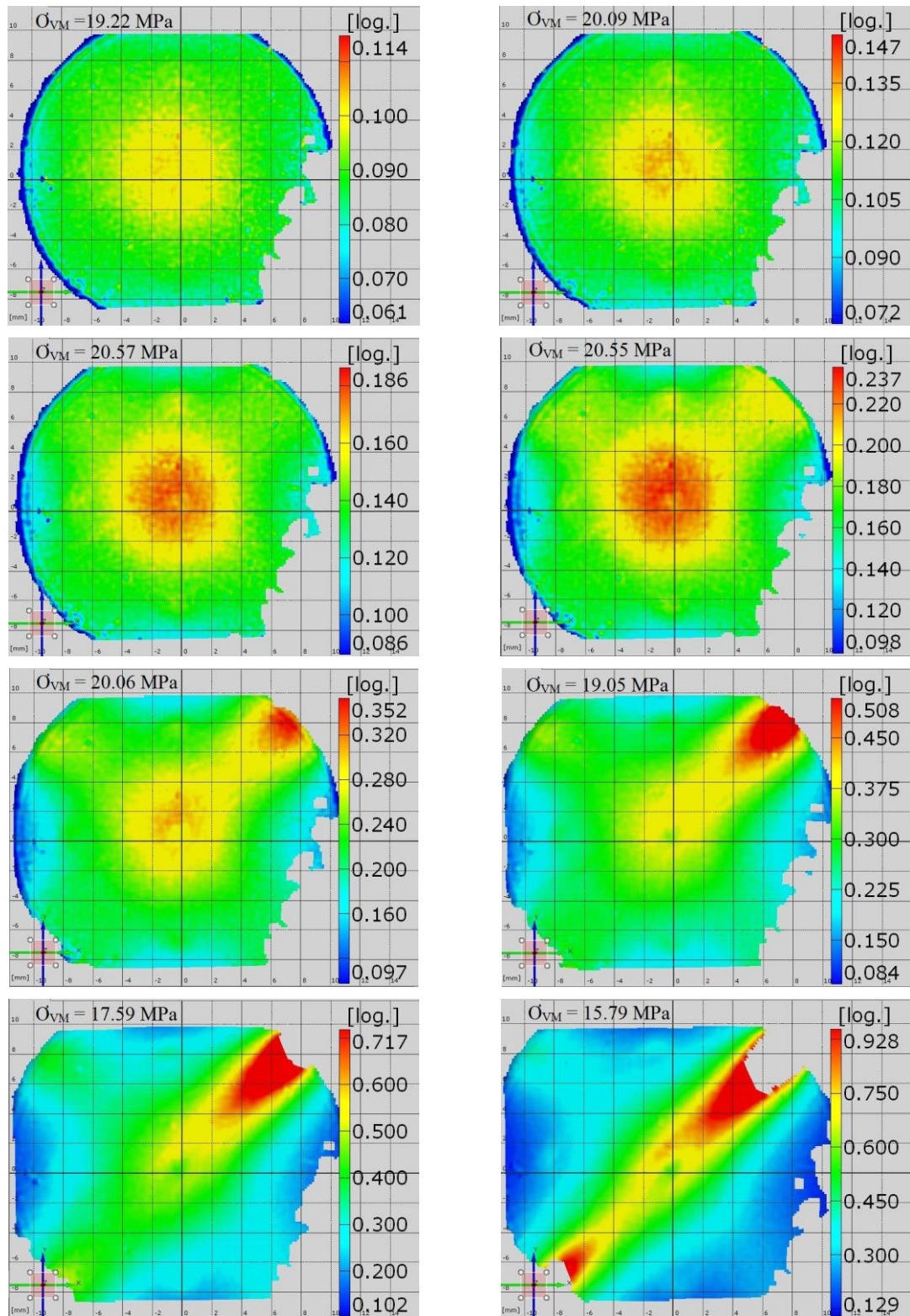


Figura 40 - Extensão equivalente de von Mises em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,VM}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 10 mm/min (continuação).

Na Figura 41 podem observar-se as curvas de tensão aparente – deformação real para os eixos x e y de um ensaio a 10 mm/min. As deformações apresentadas nestas curvas são uma média de todas as deformações medidas na zona central do provete.

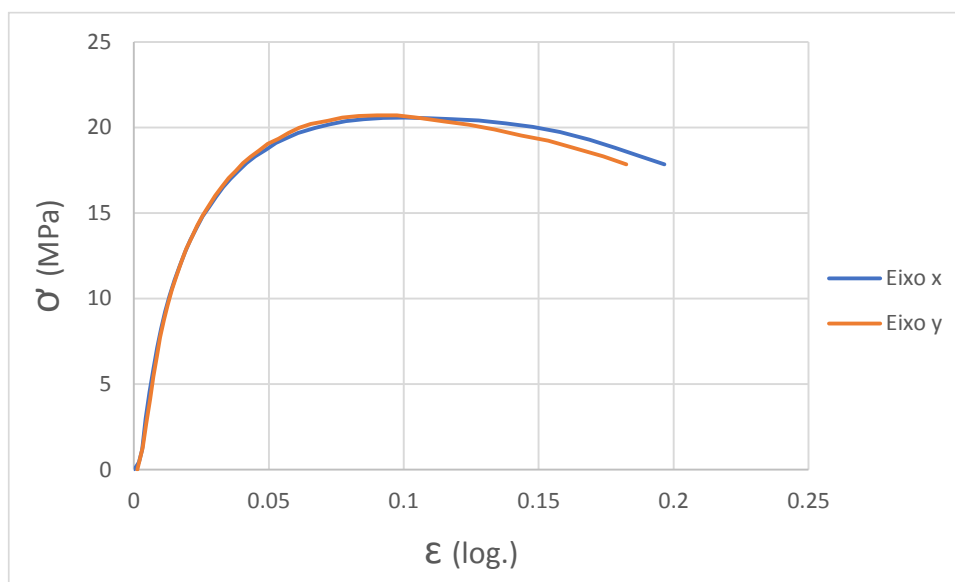


Figura 41 – Curvas de tensão aparente – deformação real dos eixos x e y de ensaio a 10 mm/min

Como seria de esperar, as evoluções de  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  são praticamente iguais, o que confirma o bom funcionamento do dispositivo de ensaio e que foram seguidos os procedimentos iniciais corretos. Independentemente da extensão considerada, pode-se observar que se desenvolve primeiro no centro do provete uma zona de extensões mais altas. Porém, numa fase posterior, acaba por surgir uma zona de concentração de extensões na zona de rebaixo, na qual acaba por se iniciar a rutura. Conforme esperado, a rutura ocorreu a 45° relativamente aos eixos de carregamento (Figura 42). As tensões  $\sigma_{AP,x}$  e  $\sigma_{AP,y}$  máximas atingidas durante o ensaio foram de 20.7 MPa. Por seu turno, as extensões máximas observadas no momento da rutura foram  $\epsilon_x = 6.98 \times 10^{-1}$  e  $\epsilon_y = 7.94 \times 10^{-1}$ .



Figura 42 – Fotografia de provete após o ensaio biaxial a 10 mm/min.

As Figuras 43 a 45 mostram imagens relativas às extensões  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_{VM}$  obtidas do ARAMIS ao longo do ensaio a 1 mm/min.

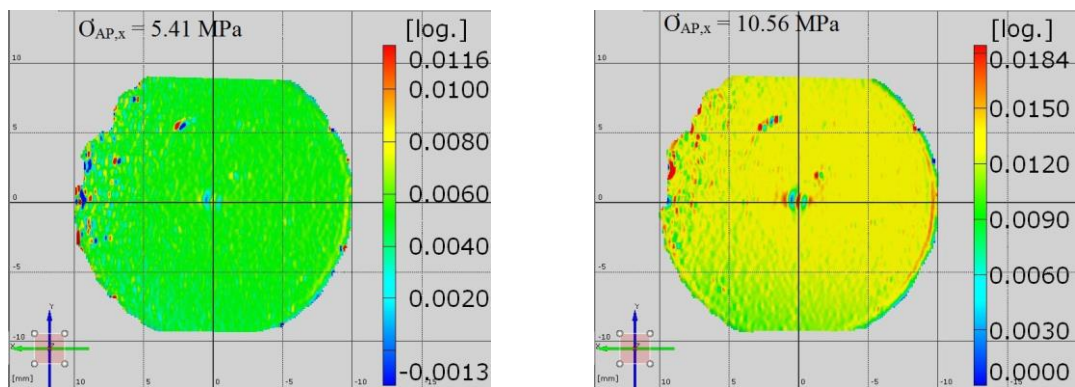


Figura 43 - Extensão  $\varepsilon_x$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,x}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 1 mm/min.



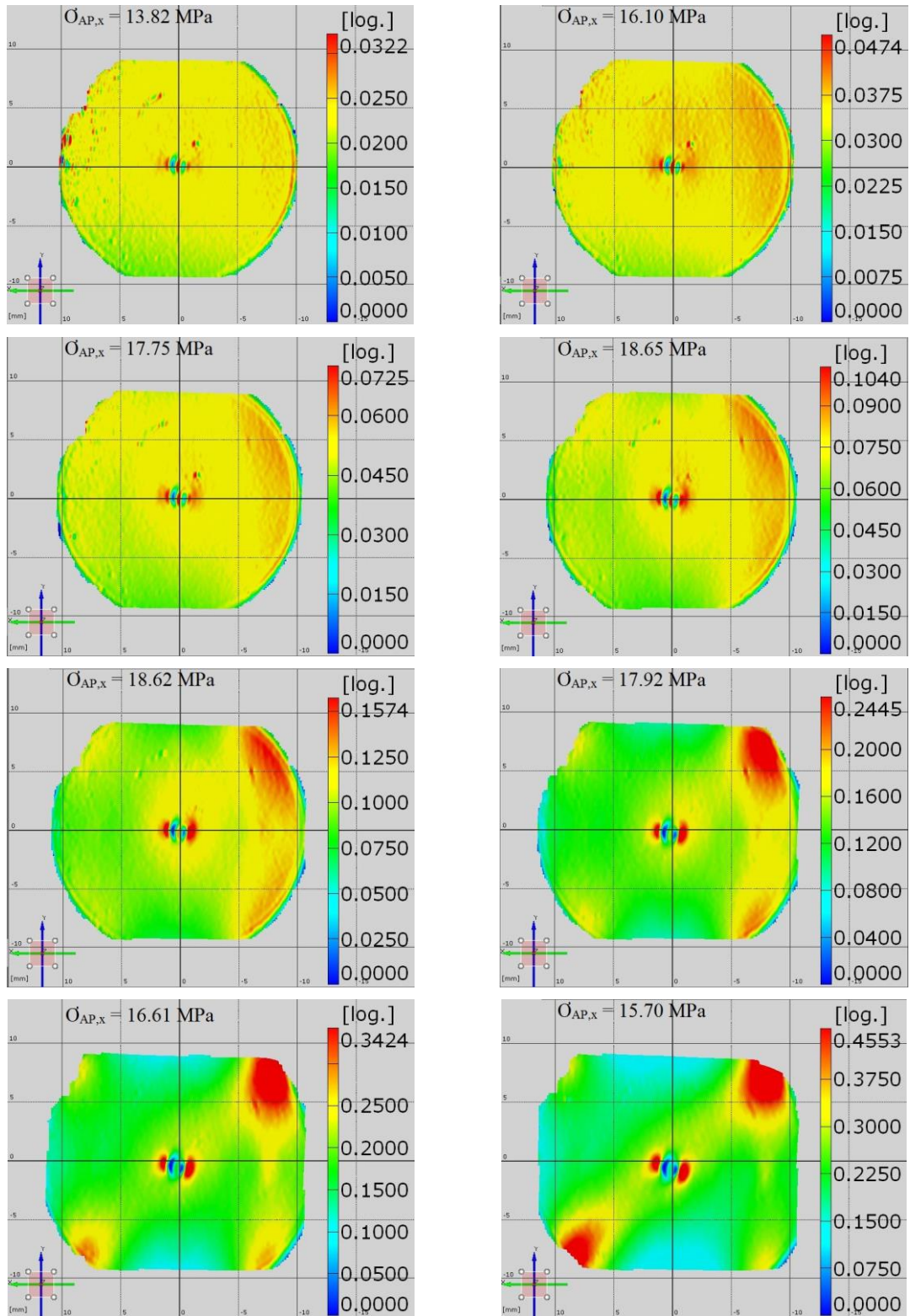


Figura 43 - Extensão  $\epsilon_x$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,x}$  indicada no topo das imagens ao ao longo de ensaio a 1 mm/min (continuação).

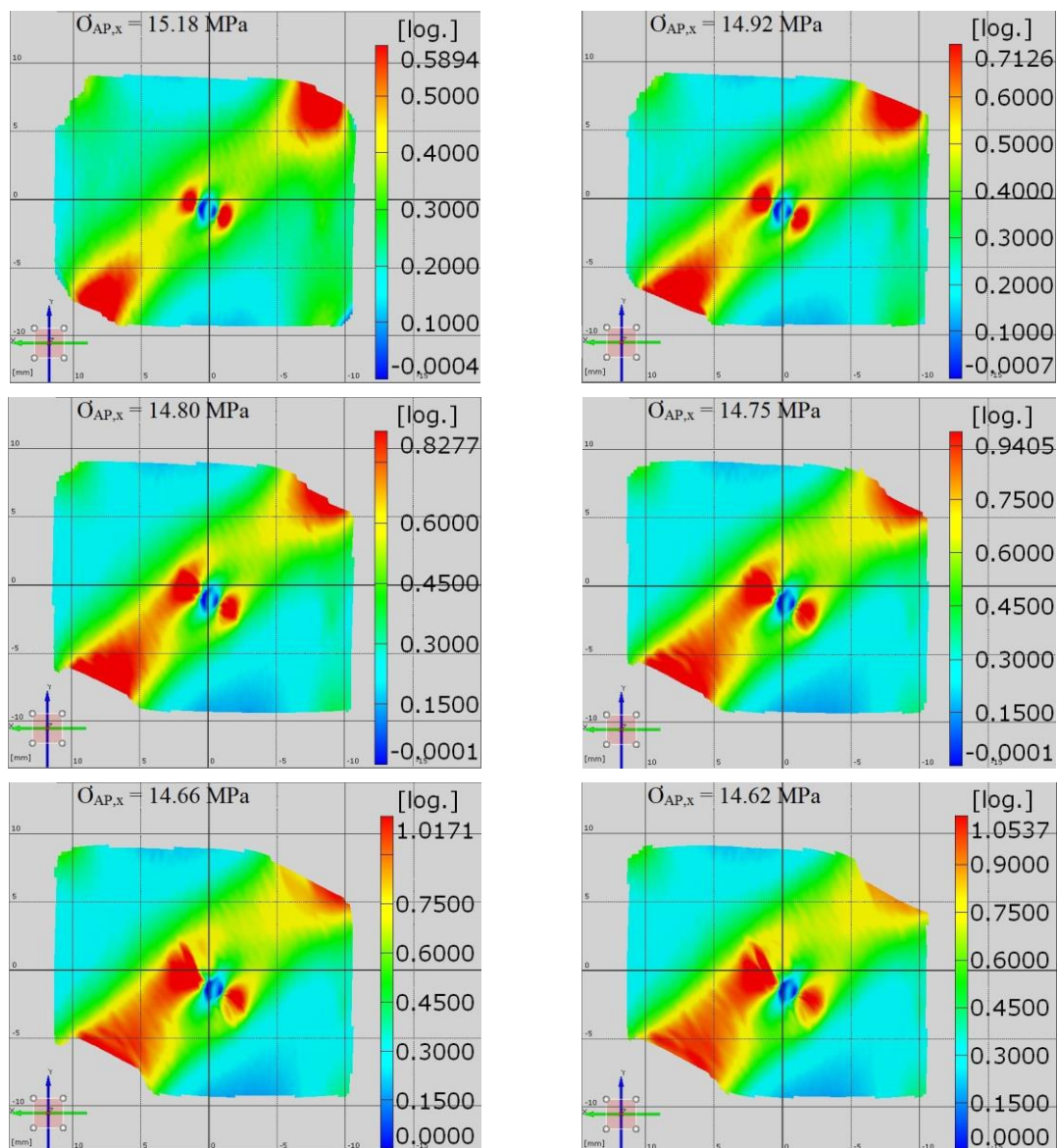


Figura 43 - Extensão  $\varepsilon_x$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,x}$  indicada no topo das imagens ao ao longo de ensaio a 1 mm/min (continuação).

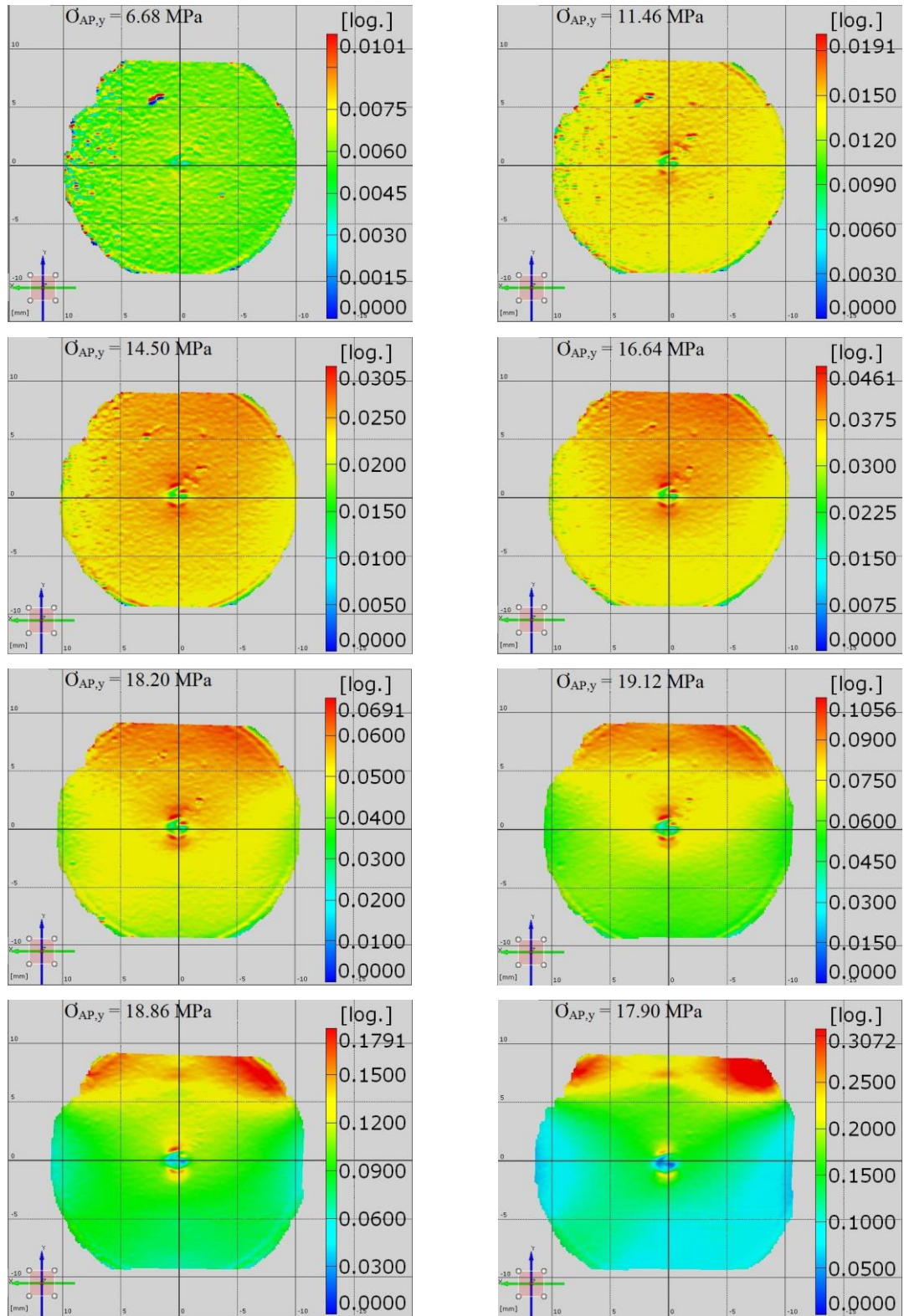


Figura 44 - Extensão  $\varepsilon_y$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,y}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 1 mm/min.



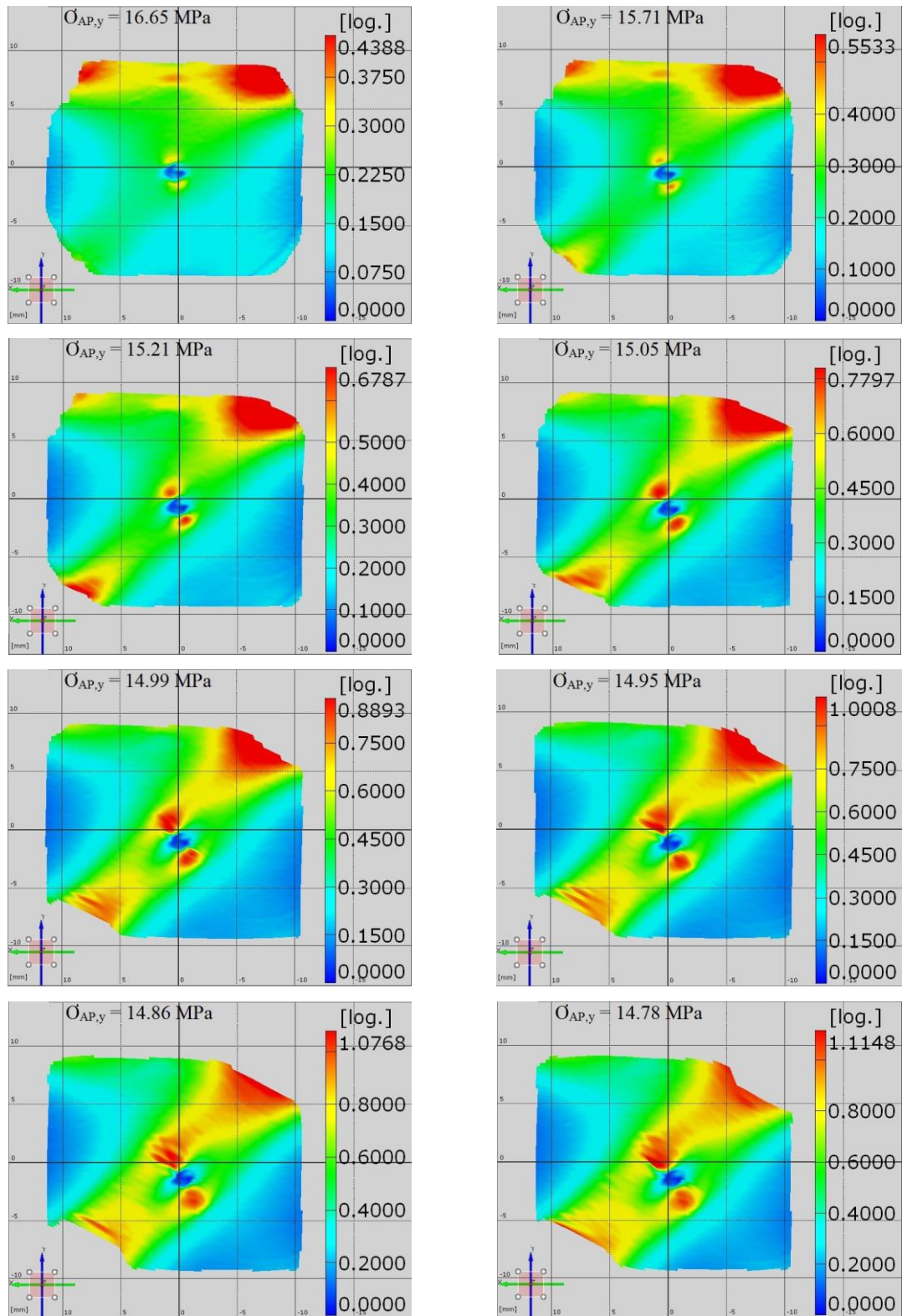


Figura 44 - Extensão  $\varepsilon_y$  em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,y}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 1 mm/min (continuação).

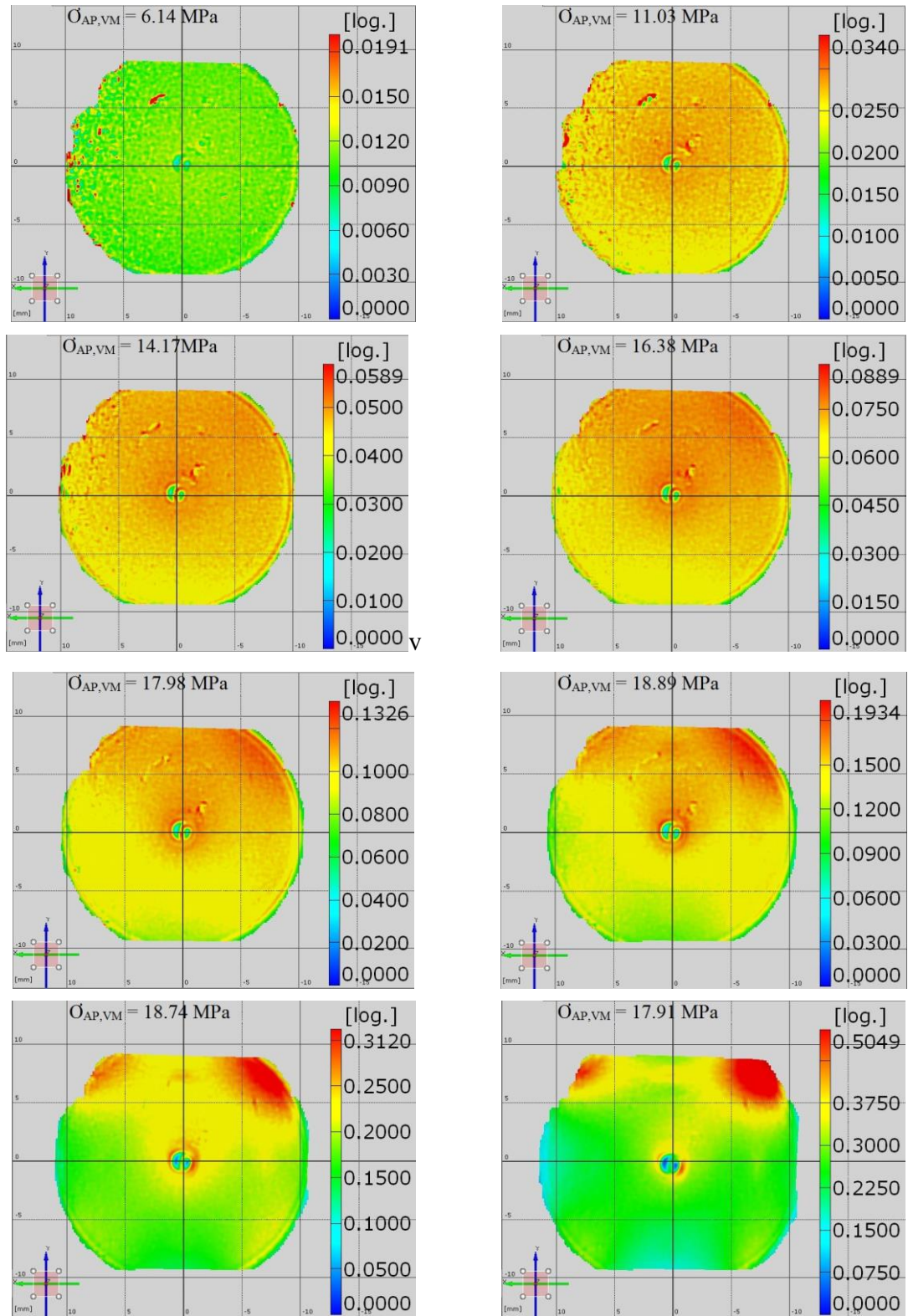


Figura 45 - Extensão equivalente de von Mises em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,VM}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 1 mm/min.



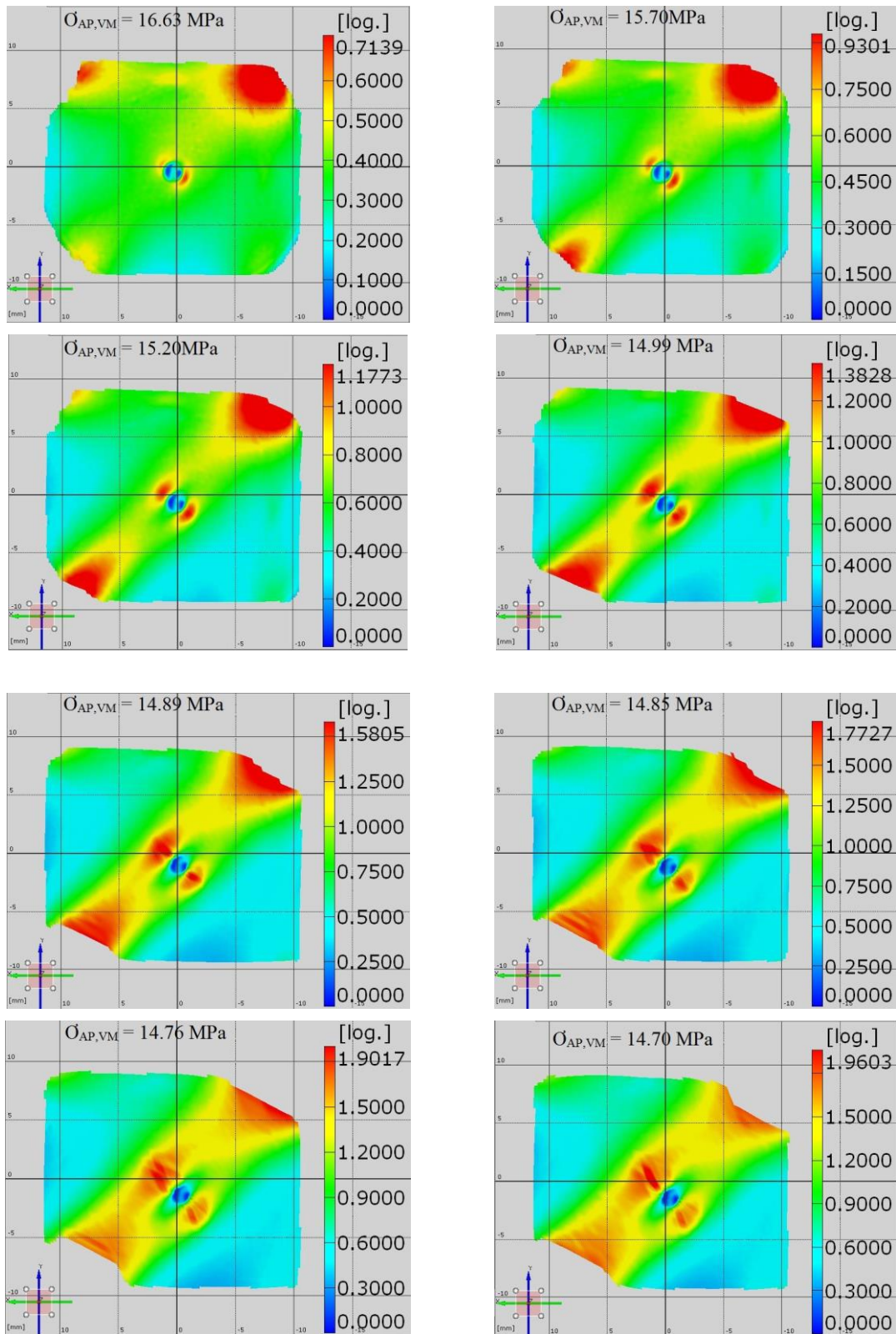


Figura 45 - Extensão equivalente de von Mises em função da tensão aparente  $\sigma_{AP,VM}$  indicada no topo das imagens ao longo de ensaio a 1 mm/min (continuação).

Na Figura 46 podem observar-se as curvas de tensão aparente – deformação real para os eixos x e y de um ensaio a 1 mm/min. As deformações apresentadas nestas curvas são uma média de todas as deformações medidas na zona central do provete.

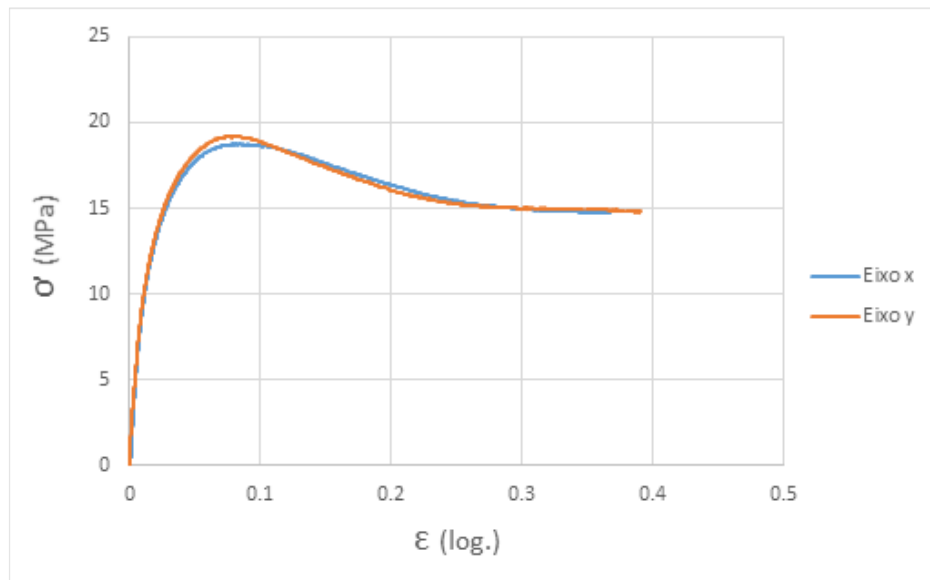


Figura 46 - Curvas de tensão aparente – deformação real dos eixos x e y de ensaio a 1 mm/min

Na Figura 47 são apresentadas as curvas de  $\sigma_{AP,VM} - \epsilon_{VM}$  dos ensaios a 10 mm/min e 1 mm/min.

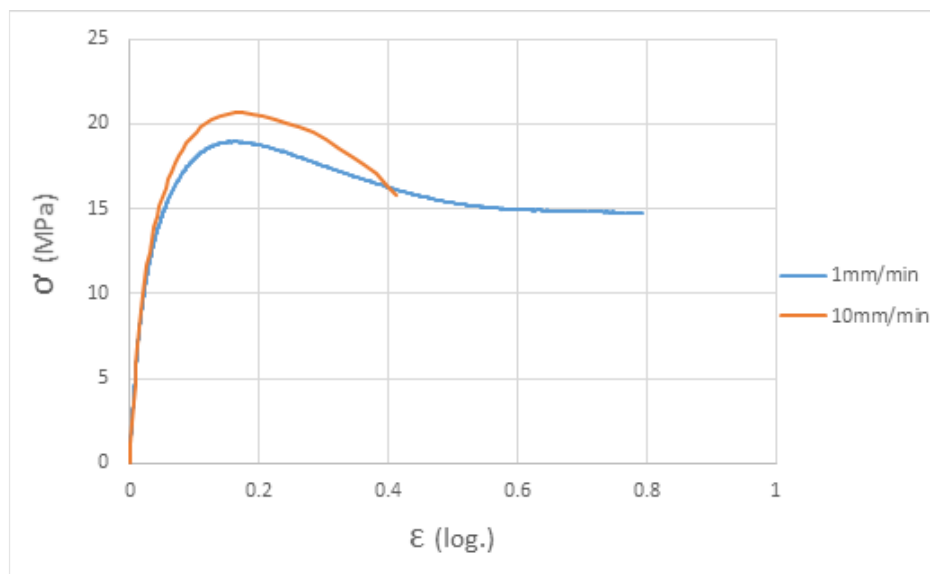


Figura 47 – Curvas  $\sigma_{AP,VM} - \epsilon_{VM}$  dos ensaios a 10 mm/min e 1 mm/min.

No ensaio a 1 mm/min também se verifica que as evoluções de  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  são muito semelhantes. Pode-se observar o desenvolvimento de extensões elevadas na zona central e numa zona oblíqua a 45° com os eixos de carregamento. Os níveis de tensões atingidos são mais baixos do que no ensaio a 10 mm/min, mas as extensões chegaram a valores muito elevados. A fotografia de um provete durante o ensaio (figura 48) mostra as deformações elevadíssimas, não tendo havido rutura. As tensões  $\sigma_{AP,x}$  e  $\sigma_{AP,y}$  atingiram máximos de 19.2 MPa.

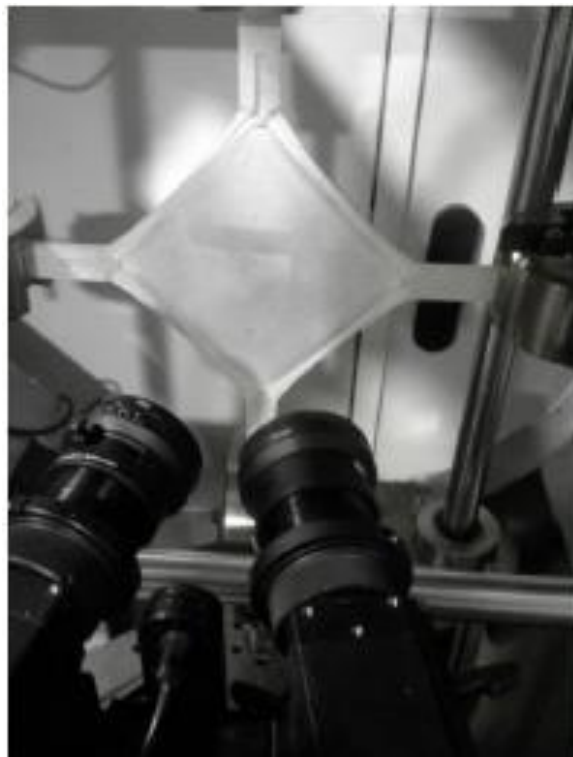


Figura 48 – Provete cruciforme ensaiado a 1 mm/min.

Portanto, os resultados dos ensaios biaxiais confirmam a elevada influência da taxa de deformação no comportamento mecânico deste material, sobretudo na extensão de rutura.



## **4. Conclusões e trabalhos futuro**





O trabalho realizado permitiu tirar as seguintes conclusões:

- a máquina de ensaios biaxiais desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, usada em combinação com a técnica de correlação digital de imagem, tem as características adequadas para estudar o comportamento mecânico de materiais poliméricos;
- o comportamento mecânico do polipropileno perante tração biaxial é muito sensível à taxa de deformação, sobretudo no que diz respeito à extensão de rutura; o efeito da taxa de deformação foi semelhante ao que se observou nos ensaios uniaxiais de tração;
- a geometria do provete cruciforme utilizada não foi a mais adequada para o estudo pleno do comportamento mecânico do polipropileno, dado que a rutura não se iniciou na zona de medida.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- a realização de análises numéricas dos ensaios realizados no sentido de interpretar de forma mais rigorosa os resultados obtidos;
- o desenvolvimento de geometrias de provetes cruciformes que promovam efetivamente a rutura na zona de medida;
- a realização de ensaios com diferentes combinações de velocidades em cada eixo, com o objetivo de validar modelos de cedência e rutura.



## **Bibliografia**



1. Degarmo EP, Black JT, Kohser RA. Materials and Processes in Manufacturing. 1997. 1259 p. ISBN: 978-0470924679.
2. Groover MP. Fundamentals of Modern Manufacturing. 4th ed. 2010. 1008 p. ISBN: 978-0470-467002.
3. Hannon A, Tiernan P. A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal. *J Mater Process Technol.* 2008;198:1–13.
4. Altenbach, H., Tushtev K. A new static failure criterion for isotropic polymers. *Mech Compos Mater.* 2001;37(5):475–82.
5. Quaak G. Biaxial Testing of Sheet Metal : An Experimental-Numerical Analysis. Master Thesis, Computational and Experimental Mechanics, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology; 2008.
6. Bhatnagar N, Bhardwaj R, Selvakumar P, Brieu M. Development of a biaxial tensile test fixture for reinforced thermoplastic composites. *Polym Test.* 2007;26(2):154–7.
7. Makris A, Ramault C, van Hemelrijck D, Clarke A, Williamson C, Gower M, et al. A review of biaxial test methods for composites. In: 13th International Conference on Experimental Techniques, Alexandroupolis, Greece, 2007.
8. Raghavan K. A simple technique to generate in-plane forming limit curves and selected applications. *Metall Mater Trans A.* 1995;26(8):2075–84.
9. Hemelrijck D Van, Makris A. Biaxial testing of fibre-reinforced composite laminates. *J Mater Des Appl.* 2008;222(4):231–9.
10. Smits A, Hemelrijck D, Philippidis T, Cardon A. Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates. *Compos Sci Technol.* 2006;66:964–75.
11. Hemelrijck D, Smits A. Biaxial testing of fibre reinforced composites. Project report: Optimat Blades, 2003;
12. Shiratori E, Ikegami K. A New Biaxial Tension Testing Machine with Flat Specimens. *J Soc Mater Sci.* 1967;16:964–75.
13. Makinde A, Thibodeau L, Neale KW. Development of an apparatus for biaxial testing using cruciform specimens. *Exp Mech.* 1992;32(2):138–44.
14. Boehler J. P, Demmerle S, Koss S. A new direct testing machine for anisotropic materials. *Exp Mech.* 1994;34(1):1–9.

15. Kuwabara T, Ikeda S, Kuroda K. Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel sheet under biaxial tension. *J Mater Process Technol.* 1998;80–81:517–23.
16. Hoferlin E. The design of a biaxial tensile test and its use for the validation of crystallographic yield loci. *Model Simul Mater Sci Eng.* 2000;8(4): 423-23.
17. Ferron G, Makinde A. Design and development of a biaxial strength testing device. *J Test Eval.* 1988;16(3):253–6.
18. Terriault P, Settouane K, Brailovski V. Biaxial testing at different temperatures of cruciform TI–NI samples. In: *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST)*. Pacific Grove, USA; 2003. p. 247–57.
19. Araújo J. Dispositivo de ensaio biaxial de provetes cruciformes. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro; 2013.*
20. Marques TMJ. Ensaio biaxial sob tensões normais. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro; 2013.*
21. Maio JPM. Projeto e Construção de Máquina de Ensaio Biaxiais. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro; 2014.*
22. GOM Optical Measuring Technologies. *ARAMIS: User Manual - Hardware.* 2008.
23. McCormick N, Lord J. Digital image correlation. *Mater Today.* 2010;13(12):52–4.
24. Yoneyama S, Murasawa G. Digital image correlation. *Exp Mech.*
25. Chen J, Niezrecki C, Sherwood J, Avitabile P. Effect of Manufacturing Induced Defects on Reliability of Composite Wind Turbine Blades. *University of Massachusetts Lowell; 2012.*
26. Bruck HA, McNeill SR, Sutton MA, Peters WH. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Exp Mech.* 1989;29(3):261–7.
27. Sepe M. Understanding strain-rate sensitivity in polymers. *Plast Technol.* 2016;62(8):26–9.
28. Batista PMR. Conceção de Amostras para Ensaio Biaxiais. *Dissertação de*

- Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro; 2013.
29. Filipe B. Sensibilidade à mudança de trajetória de deformação no aço TWIP980. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro; 2014.
30. Shigley JE, Mischke CR, Budynas RG. Shigley's Mechanical Engineering Design - 9th Ed. Vol. New York, Mechanical Engineering. 2002. 223 p. ISBN: 978-0-07-352928-8.





**Anexos**



**Anexo 1 – Propriedades do material utilizado nos provetes(20)**

PROPRIEDADES	Ensaio DIN	Unidades	PP
Cor			Natural
Densidade	53479	g/cm <sup>3</sup>	0.91
<b>Absorção da água</b>			
Até à saturação no ar a 23° C / 50 % RH	53495	%	0
Até à saturação na água a 23 ° C	-	%	0
<b>Propriedades Térmicas</b>			
Temperatura de fusão	-	° C	165
Temperatura de transição vítrea	53460	° C	90
Condutibilidade térmica a 23° C	52612	w/(K.m)	0.22
Coeficiente de expansão térmica: entre 23 e 60° C	-	10E -6m/(m.,k)	
Coeficiente de expansão térmica: entre 23 e 100° C		10E -6m/(m.,k)	200
<b>Temperatura máxima de serviço (ao ar)</b>			
Períodos curtos	-	° C	135
Em contínuo	-	° C	90
Temperatura mínima de serviço	-	° C	0
<b>Inflamabilidade:</b>			
- Índice de oxigénio	-	%	18
- De acordo com UL 94 ( espessura 1,6 mm )	-	-	
<b>Propriedades Mecânicas</b>			
<b>Ensaio de tracção :</b>			
Resistência à tracção - deformação	53455	MPa	30
Deformação à ruptura	53455	%	70
Módulo de elasticidade	53457	MPa	1300
<b>Ensaio de compressão :</b>			
Resistência à compressão com 2% de deformação	53454	MPa	11
<b>Ensaio de fluência á tracção :</b>			
Esforço p/ produzir 1 % de alongamento em 23°C/100°C	53461	MPa	22
Resistência ao impacto sem entalhe - CHARPY	53453	KJ/m <sup>2</sup>	8
Resistência ao impacto com entalhe - CHARPY	53453	KJ/m <sup>2</sup>	Sem ruptura
Dureza por bola de aço	53456	N/mm <sup>2</sup>	65
Dureza Shore	53305	-	D 65
<b>Propriedades Eléctricas</b>			
Rigidez eléctrica	53481	kV/mm	58
Resistividade volumétrica	53482	Ohm. cm	> 10 <sup>17</sup>
Resistividade superficial	53482	Ohm	10 <sup>14</sup>
Constante dieléctrica - a 50Hz	53483	-	2.25
- a 1MHz	53483	-	
Factor de dissipação dieléctrica tan. δ : - a 100 Hz	53483	-	0.0002
- a 1 MHz		-	
Resistência á descarga superficial	IEC 112	-	

NOTA: 1 g/cm<sup>3</sup> = 1.000 kg/m<sup>3</sup>; 1 Mpa = 1 N/mm<sup>2</sup>; 1KV/mm = 1 MV/m



## Anexo 2 – Setup do ARAMIS

Inicialmente é ligado o computador e o controlador do ARAMIS (Figura 1).



Figura 1 - Ligar o ARAMIS e o computador.

De seguida inicia-se o *software* ARAMIS v6.3.1 64bit (Figura 2).

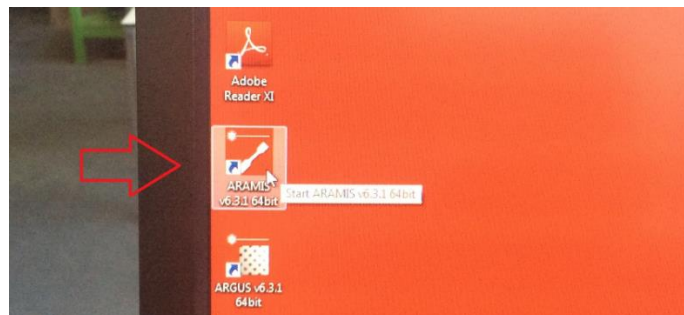


Figura 2 – Atalho para iniciar o *software* ARAMIS v6.3.1 64bit.

Após iniciar o *software* entra-se no modo projeto (Figura 3).

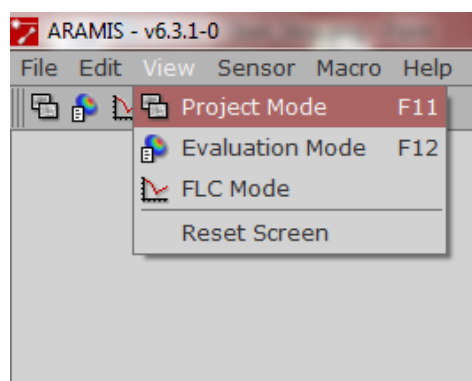


Figura 3 – Modo de projeto.

Já em modo de projeto seleciona-se o ícone com a câmara **Start/Stop Measurement Mode** (Figura 4) de modo a obter imagens das duas câmaras (Figura 5) e ligam-se o laser e os projetores de luz (Figura 6).

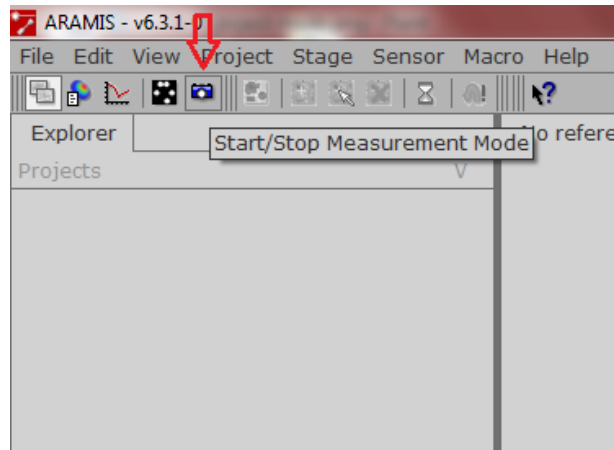


Figura 4 – Star/Stop *Measuring Mode*.

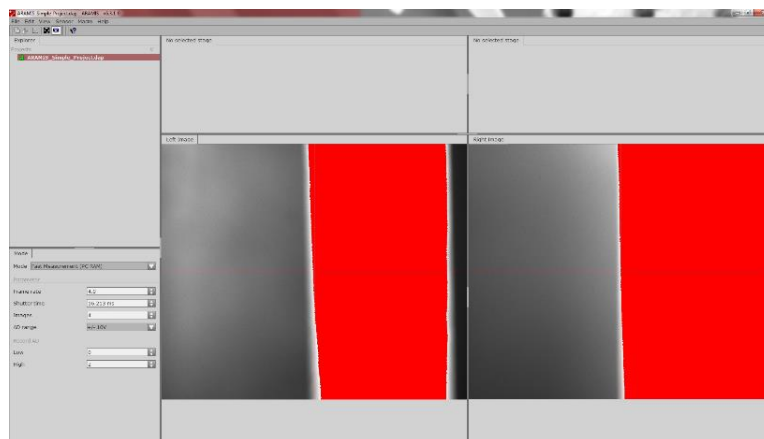


Figura 5 – Software após iniciar o *Measuring Mode*.

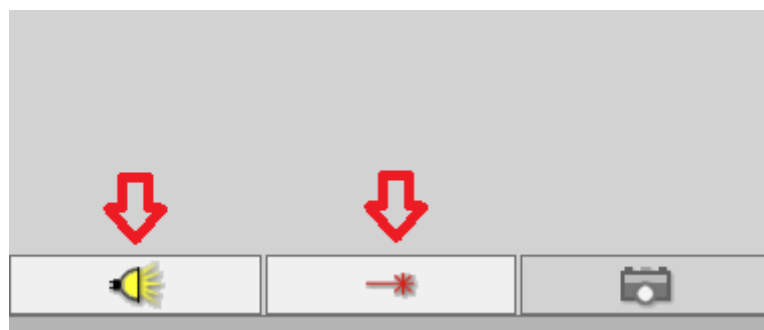


Figura 6 – Botões para ligar/desligar os projetores de luz e o laser.

Coloca-se o ARAMIS de forma a que o laser aponte para o centro da amostra a ensaiar. Para isso, o ARAMIS possui vários manípulos.

O manípulo da Figura 7 serve para subir e descer o suporte, o manípulo da Figura 8 serve para rodar o suporte, o manípulo da Figura 9 serve para movimentar o suporte para frente e para trás, e os 3 manípulos da Figura 10 servem para direcionar o suporte para a posição pretendida.



Figura 7 – Manípulo para subir e descer suporte.



Figura 8 – Manípulo para rodar o suporte.



Figura 9 – Manípulo para movimentar suporte para trás e para a frente.



Figura 10 – Manípulo para direcionar o suporte.

De seguida, é colocado o ARAMIS à distância de medição (*measuring distance*). Esta distância é medida com uma fita métrica entre o centro do suporte das câmaras e o ponto laser que incide na amostra a medir. Na Figura 11 podemos ver a vista de topo da disposição do ARAMIS e a definição de vários termos, sendo um deles a distância de medição.

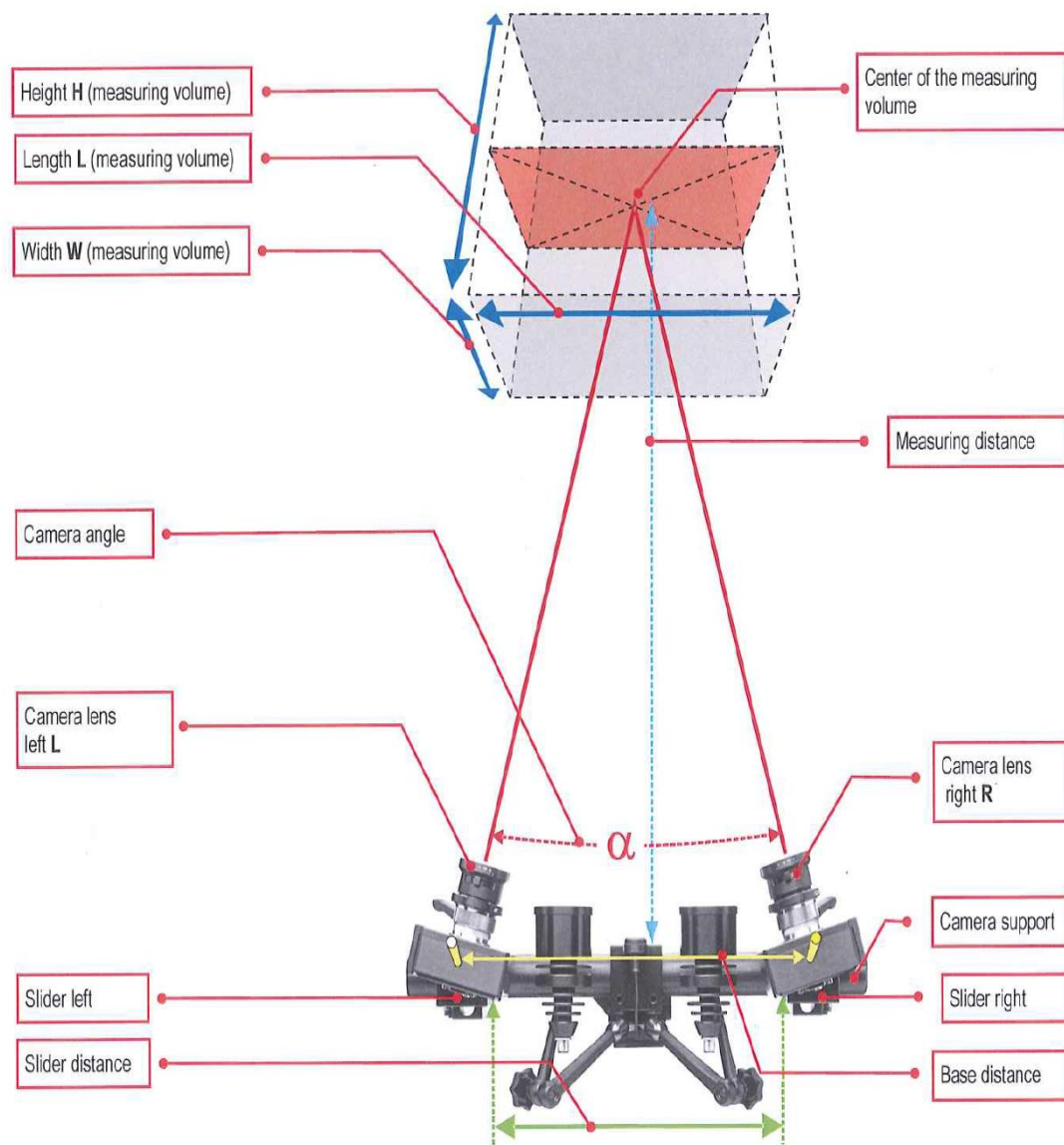


Figura 11 – Vista de topo do ARAMIS (22).

A distância de medição é consultada na Tabela 1. O manual do *hardware* do ARAMIS contém várias tabelas para este efeito. A tabela a consultar é escolhida sabendo qual o sensor (neste caso ARAMIS 5M LT) e as lentes a utilizar.

As lentes a utilizar podem ser escolhidas consultando a Tabela 2. Para escolher as lentes é necessário saber o volume da amostra e o sensor disponível. No DEM-UA só está disponível a lente Titanar de 50 mm (Figura 12).



Tabela 1 – Lente 50 mm, ARAMIS 5M LT (22).

Sensor	Lens	Measuring volume [mm <sup>3</sup> ]	Comment	Min. length camera support [mm]	Distance ring [mm]	Measuring distance [mm]	Slider distance [mm]	Camera angle [°]	Calibration Object	Aperture dependent depth of field [mm]														
										1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32					
ARAMIS 5M	Titanar 50mm	15 x 13	—	500	20	205	MS	26	CQ 15x12	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,9	—	—				
		20 x 17	—	500	10	230	64	26	CQ 23x18	—	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,4	2,7	—	—				
		25 x 21	—	500	10	250	74	25	CQ/CP20 30x24	—	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,4	4,5	—	—				
		35 x 29	—	500	—	310	98	25	CQ/CP20 30x24	—	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	5	11	—	—				
		50 x 42	—	500	—	395	136	25	CQ/CP20 55x44	—	—	—	n.a.	n.a.	1,4	6,8	14	25	—	—				
		65 x 55	—	500	—	485	176	25	CQ/CP20 55x44	—	—	—	n.a.	0,3	6,1	15	26	45	—	—				
		80 x 65	—	500	—	575	216	25	CP20 90x72	—	—	—	n.a.	4,1	13	26	43	70	—	—				
		100 x 85	—	500	—	695	270	25	CP20 90x72	—	—	—	1,2	11	25	45	70	>100	—	—				
		125 x 100	—	500	—	845	336	25	CP20 90x72	—	—	—	8,3	24	45	76	120	>125	—	—				
		150 x 130	—	800	—	995	402	25	CP20 175x140	—	—	—	18	40	70	110	>150	>150	—	—				
		175 x 150	—	800	—	1150	472	25	CP20 175x140	—	—	—	31	81	100	160	>175	>175	—	—				
		200 x 170	—	800	—	1300	540	25	CP20 250x200	—	—	—	46	85	140	>200	>200	>200	—	—				
		250 x 210	—	800	—	1600	674	25	CP20 250x200	—	—	—	85	150	230	>250	>250	>250	—	—				
		300 x 250	—	800	—	1920	688	21	CP20 350x280	—	—	—	150	230	>300	>300	>300	>300	—	—				
350 x 290	2)	1200 fixed	—	2160	—	31	CP20 350x280	—	—	—	170	290	>350	>350	>350	>350	—	—						
400 x 330	2)	1200 fixed	—	2490	—	27	CP20 350x280	—	—	—	260	>400	>400	>400	>400	>400	—	—						
500 x 420	2)	1200 fixed	—	3140	—	21	CC20 500x400	—	—	—	470	>500	>500	>500	>500	>500	—	—						
750 x 630	2)	1600 fixed	—	4685	—	19	CC20 1000x800	—	—	—	>750	>750	>750	>750	>750	>750	>750	—	—					
Legend		1)	without laser pointer							—	Lens cannot be adjusted to the aperture value.													
		2)	For further information please refer to the user information										n.a.	It is not possible to focus the complete measuring volume.										
		Hardware for ARAMIS (Fixed Base).										*	Resolution limited by aperture.											
		NIS										Slider distance at Mech. Stop												

Tabela 2 – Visão geral: sensores, lentes, suportes → volumes de medição (22).

Sensors		Lenses (focal length)	Measuring volume			
			Min. Range		Max. Range	
			Length x width [mm x mm]		Length x width [mm x mm]	
Camera support (length)		Adjustable Base				
		500 mm		800 mm		
Camera support		25°	25°	25°	25°	
ARAMIS 2M ARAMIS 2M LT	8 mm	170x130	780x590	170x130	1350x1060	
	12 mm	110x85	530x400	110x85	910x690	
	17 mm	75x55	380x290	75x55	650x490	
	23 mm	55x42	280x210	55x42	480x370	
	35 mm	30x23	180x140	30x23	320x240	
	50 mm	15x11	120x90	15x11	220x170	
	75 mm	10x8	75x55	10x8	140x110	
	100 mm	10x8	55x42	10x8	100x75	
ARAMIS 5M ARAMIS 5M LT	8 mm	200x170	900x750	200x170	1550x1300	
	12 mm	130x110	620x520	130x110	1060x880	
	17 mm	90x75	440x370	90x75	760x640	
	23 mm	65x55	330x280	65x55	570x480	
	35 mm	36x30	210x180	36x30	370x310	
	50 mm	18x15	140x120	18x15	260x220	
	75 mm	10x8	90x75	10x8	170x140	
	100 mm	10x8	65x55	10x8	120x100	
ARAMIS 4M	20 mm	140x100	720x530	140x100	1250x920	
	35 mm	65x48	410x300	65x48	730x540	
	50 mm	29x21	280x210	29x21	610x370	
	75 mm	20x15	180x130	20x15	330x240	
	100 mm	10x7	130x95	10x7	240x180	
ARAMIS 12M	24 mm	135x100	850x640	135x100	1500x1150	
	35 mm	90x70	590x440	90x70	1050x790	
	50 mm	50x38	410x310	50x38	720x540	
	75 mm	35x26	260x200	35x26	470x350	
	100 mm	25x19	180x140	25x19	350x260	
ARAMIS HS	20 mm	100x80	730x580	100x80	1300x1050	
	24 mm	90x70	620x500	90x70	1100x880	
	35 mm	55x44	420x340	55x44	750x600	
	50 mm	32x26	290x230	32x26	520x420	
	75 mm	22x18	180x140	22x18	340x270	
	100 mm	10x8	130x100	10x8	250x200	



Figura 12 – Lente Titanar 50mm.

Depois de ajustar a distância de medição as câmaras, devem ser colocadas na posição certa. Para isso, devem seguir-se os passos abaixo:

- 1- Desapertar o manípulo maior (Figura 13). Neste momento, as câmaras podem mover-se na direção radial por meio do parafuso de ajuste de precisão (Figura 14).



Figura 13 – Manípulo maior.



Figura 14 – Parafuso de ajuste de precisão.

- 2- Desapertar o manípulo menor (Figura 15). Neste momento, as câmaras podem mover-se livremente nas direções radial e axial.

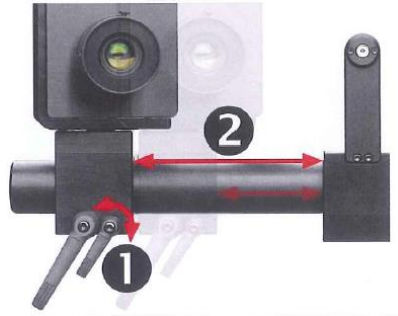


Figura 15 – Alavanca menor.

- 3- Colocar as câmaras com a distância entre elas (*slider distance*) indicada na Tabela 1 (Figura 16). Ao efetuar este passo, devem-se ajustar as câmaras de forma a que as linhas horizontais das imagens das câmaras fiquem próximas da projeção do laser na amostra (Figura 17). Finalmente, volta-se a apertar o manípulo menor.

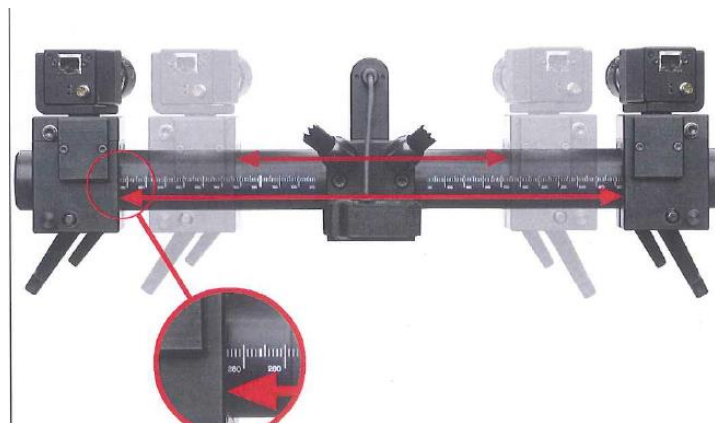


Figura 16 – Distância entre câmaras.



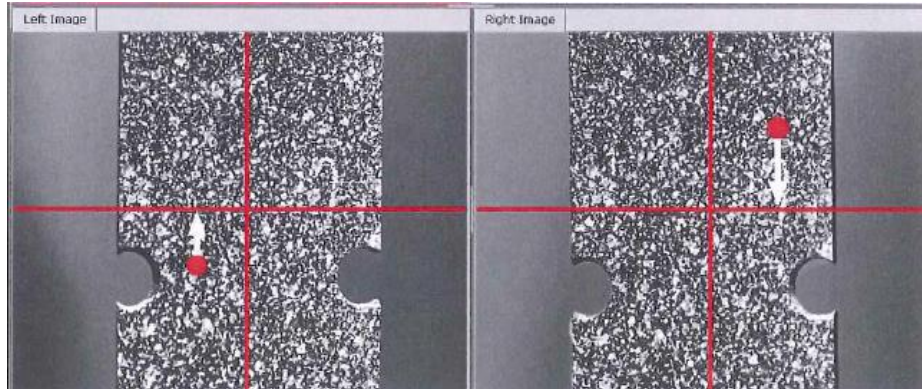


Figura 17 – Alinhamento vertical das câmaras.

- 4- Agora deve-se desapertar o parafuso da Figura 18 e ajustar a câmara, de modo a que as linhas verticais das imagens das câmaras fiquem alinhadas com a projeção do laser na amostra (Figura 19), e voltando-se a apertar o parafuso.

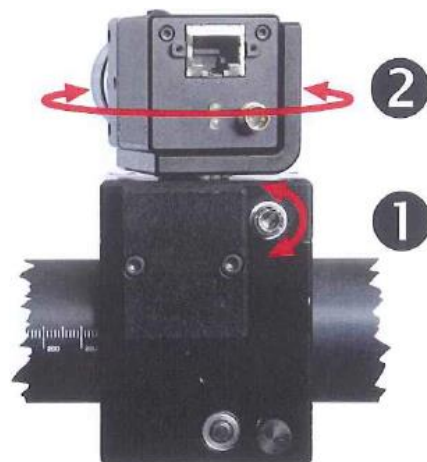


Figura 18 – Parafuso da câmara.

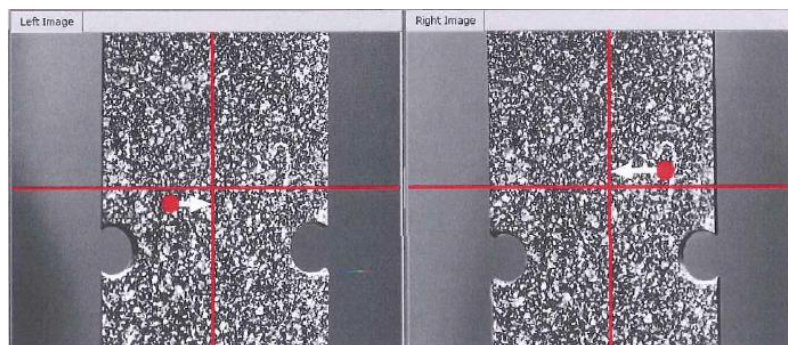


Figura 19 – Alinhamento horizontal das câmaras.

- 5- Agora ajustam-se as câmaras utilizando o parafuso da Figura 14, de modo a que as linhas horizontais das imagens fiquem alinhadas com a projeção do laser na amostra (Figura 17).
- 6- Finalmente, volta-se a apertar o manípulo maior (Figura 13).

No final destes passos, deve obter-se no *software* algo semelhante ao que se pode ver na Figura 20.

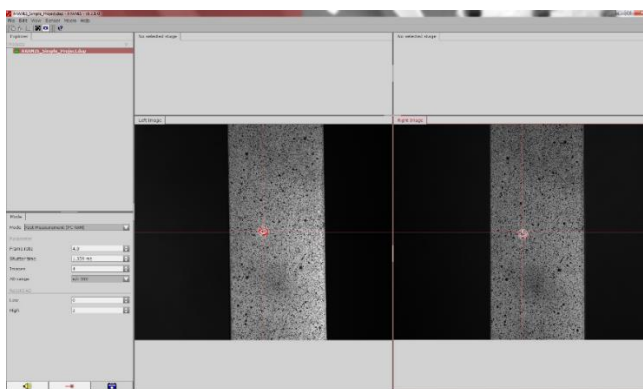


Figura 20 – Câmaras alinhadas.

De seguida, devem-se posicionar os projetores de luz de forma a iluminar a amostra de uma forma uniforme. Para isto, devem despertar-se as rótulas indicadas na Figura 21.



Figura 21 Rotulas dos projetores de luz.

As câmaras devem agora ser focadas. Desaperta-se o parafuso indicado na Figura 22 e roda-se a lente. Para auxiliar este passo, pode colocar-se um objeto com algo escrito no sítio da

amostra, cartão do cidadão por exemplo, e ajustar as lentes até que as imagens das câmaras fiquem o mais nítido possível. De seguida, volta-se a apertar o parafuso indicado na Figura 22.



Figura 22 – Parafuso das lentes.

O próximo passo é ajustar os filtros de polarização (Figura 23). Para isso, devem seguir-se os passos abaixo:

- 1- O filtro da câmara 1 não é alterado.
- 2- Tapa-se o projetor de luz 3 e ajusta-se o filtro do projetor 2, até que a imagem da câmara 1 fique com o menor brilho possível.
- 3- Destapa-se o projetor 3 e ajusta-se o filtro desse mesmo projetor, até que a imagem da câmara 1 fique com o menor brilho possível.
- 4- Finalmente ajusta-se o filtro da câmara 4, até que a imagem dessa mesma câmara fique com o menor brilho possível

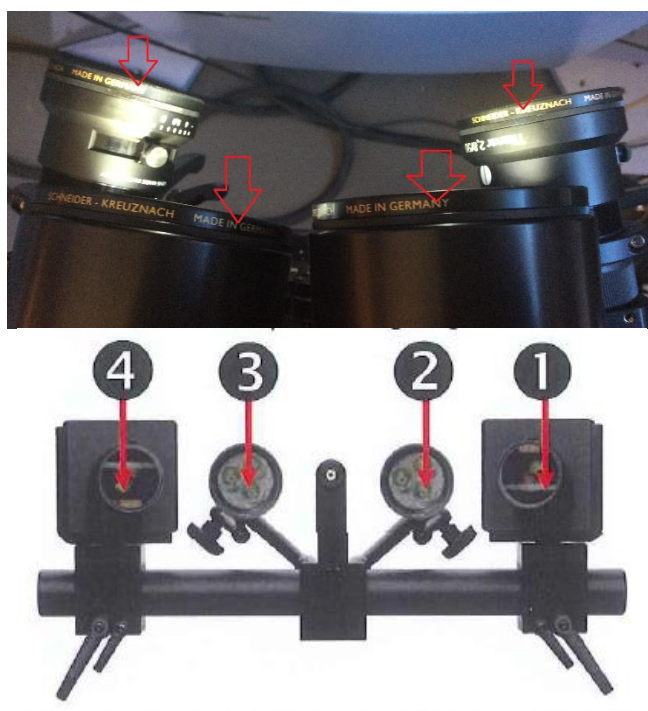


Figura 23 – Filtros de polarização

De seguida deve ajustar-se a abertura das câmaras. Para isto, deve colocar-se uma folha branca no sítio da amostra. Depois, no *software*, clica-se com o botão direito do rato em cima de uma das imagens das câmaras e seleciona-se **Image Display-False Color**.

Agora ajustam-se as aberturas das lentes (Figura 24), até que as duas imagens fiquem com uma distribuição de cores o mais aproximado possível (Figura 25).



Figura 24 – Parafusos para ajuste da abertura das lentes



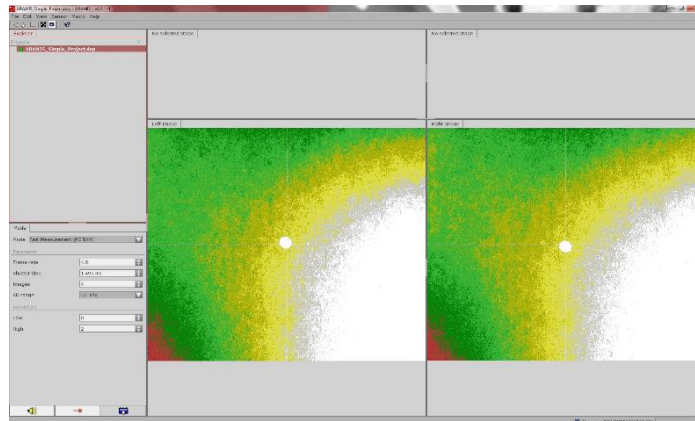


Figura 25 – Imagens das câmaras com distribuições de cores idênticas.


Neste momento está concluído o *setup* do ARAMIS.



### Anexo 3 – Calibração do ARAMIS

Inicialmente, faz-se a seleção do calibrador a utilizar. Para selecionar o calibrador a utilizar, consulta-se a Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela para seleção do calibrador a utilizar (22).

Calibration objects 	Measuring volume											
	Min. Range	Max. Range	Min. Range	Max. Range	Min. Range	Max. Range	Min. Range	Max. Range	Min. Range	Max. Range	Min. Range	Max. Range
	Length x width [mm x mm]		Length x width [mm x mm]		Length x width [mm x mm]		Length x width [mm x mm]		Length x width [mm x mm]		Length x width [mm x mm]	
Sensor	ARAMIS 2M ARAMIS 2M LT		ARAMIS 5M ARAMIS 5M LT		ARAMIS 4M		ARAMIS 12M		ARAMIS HS		ARAMIS HHS (Pho- tron SA1.1/SA5)	
CQ 10x8	10x7	12x9	9x7	12x10	10x7	12x8	—	—	9x7	12x9	7x7	10x10
CQ 15x12	15x11	18x13	14x11	18x15	15x11	18x13	—	—	14x11	18x14	11x11	15x15
CQ 23x18	23x17	28x21	21x17	28x23	24x17	28x20	23x17	28x21	22x17	28x22	17x17	22x22
CQ/CP20 30x24	29x22	50x38	27x22	50x41	30x22	50x36	30x22	50x37	28x22	50x40	22x22	44x44
CQ/CP20 55x44	50x38	88x66	46x38	88x73	52x38	88x64	51x38	88x66	48x38	88x70	38x38	75x75
CP20 90x72	86x65	130x98	78x65	130x105	89x65	130x95	87x65	130x97	82x65	130x100	65x65	110x110
CP20 175x140	155x115	200x150	140x115	200x165	160x115	200x145	155x115	200x150	145x115	200x160	115x115	165x165
CP20 250x200	225x170	365x275	205x170	365x305	235x170	365x265	230x170	365x270	215x170	365x290	170x170	310x310
CP20 350x280	330x250	495x375	300x250	495x410	345x250	495x360	335x250	495x370	315x250	495x395	250x250	455x455
CC20 500x400	520x390	660x500	470x390	660x550	540x390	660x480	520x390	660x495	490x390	660x520	390x390	660x660
CC20 700x560	690x520	880x660	630x520	880x730	710x520	880x640	700x520	880x660	650x520	880x700	520x520	880x880
CC20 1000x800	860x650	1250x950	780x650	1250x1000	890x650	1250x910	870x650	1250x930	820x650	1250x1000	650x650	1250x1250
CC20 1400x1120	1200x910	1600x1200	1100x910	1600x1300	1250x910	1600x1150	1250x910	1600x1200	1150x910	1600x1250	910x910	1600x1600
CC20 2000x1600	1750x1300	2300x1750	1600x1300	2300x1900	1800x1300	2300x1650	1750x1300	2300x1700	1650x1300	2100x1650	1300x1300	1750x1750

Para selecionar o calibrador é necessário saber qual o sensor disponível e qual a área a analisar. Para o sensor disponível no DEM, ARAMIS 5M LT, e para a área a analisar da Figura 1, o calibrador mais adequado seria o CQ 23×18 (Figura 2).

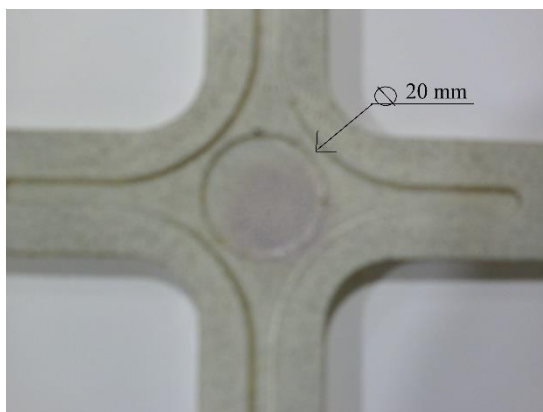


Figura 1 – Área a analisar.



Figura 2 – Cubo de calibração CQ 23×18.

Para dar início a uma calibração, clica-se no botão **calibration** (Figura 3).

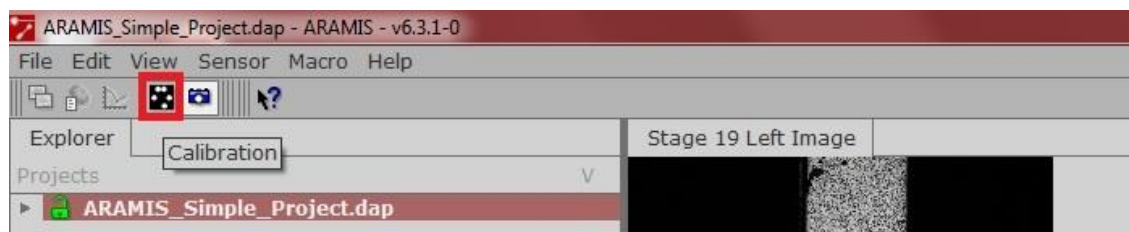


Figura 3 – Botão de início da calibração.

Aparece a janela da Figura 4, onde deve ser feita a seleção do calibrador a utilizar.

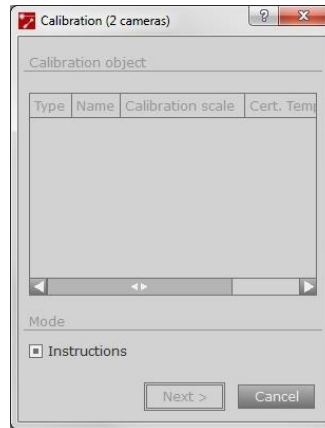


Figura 4 – Janela para seleção do calibrador

Clica-se com o botão direito do rato e adiciona-se o tipo de calibrador que se pretende utilizar (Figura 5).

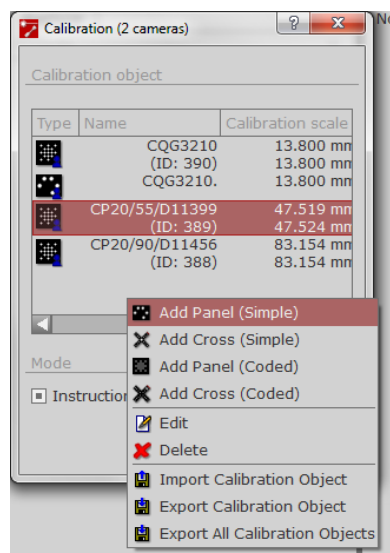


Figura 5 – Seleção do tipo de calibrador.

Devem então ser preenchidos os campos da janela da Figura 6.

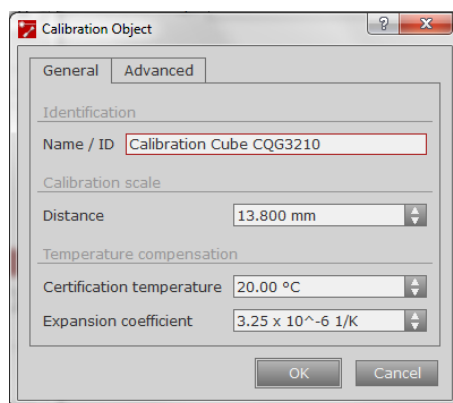


Figura 6 – Janela de identificação do calibrador.

A informação necessária para o preenchimento da janela da Figura 6 encontra-se na parte de cima do calibrador (Figura 7).

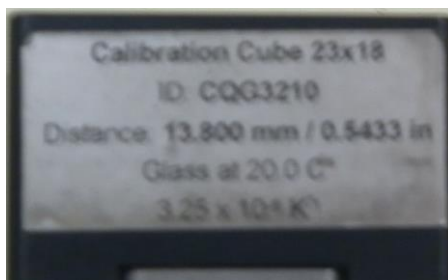


Figura 7 – Identificação e características do calibrador CQG3210

Na mesma janela, clica-se em “*advanced*” e indica-se a distância focal das lentes que vão ser utilizadas (Figura 8).

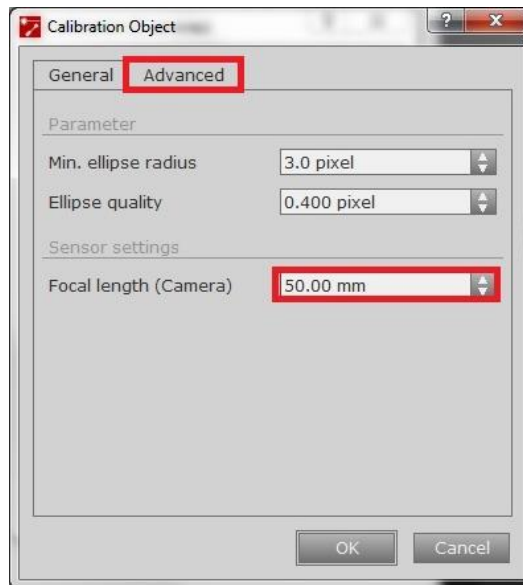


Figura 8 – Janela para seleção dos parâmetros do calibrador e distância focal das lentes.

Clica-se então em “ok” e de seguida em “next” (Figura 9).

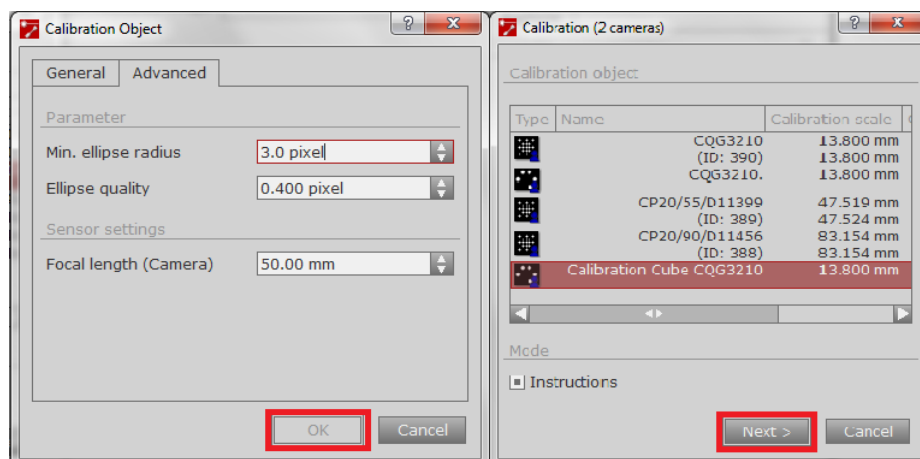


Figura 9 – Continuação da seleção do calibrador

Aparece uma janela onde se indica a distância focal das lentes e a temperatura ambiente a que se vai realizar o ensaio (Figura 10).

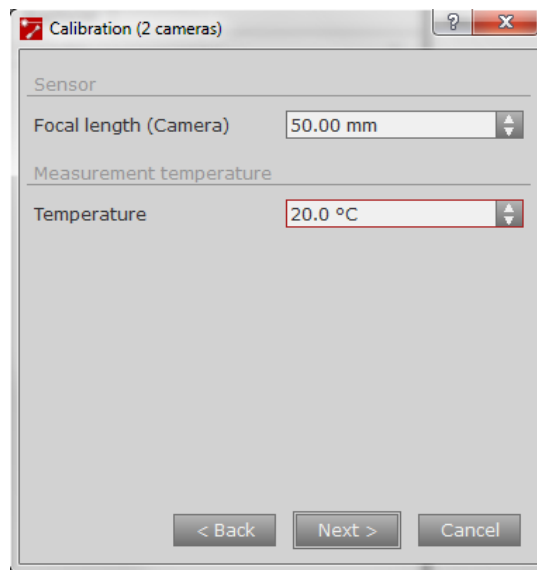


Figura 10 – Janela para indicação da distância focal das lentes e temperatura ambiente.

Clica-se em “*next*” e depois em “*finish*” (Figura 11).

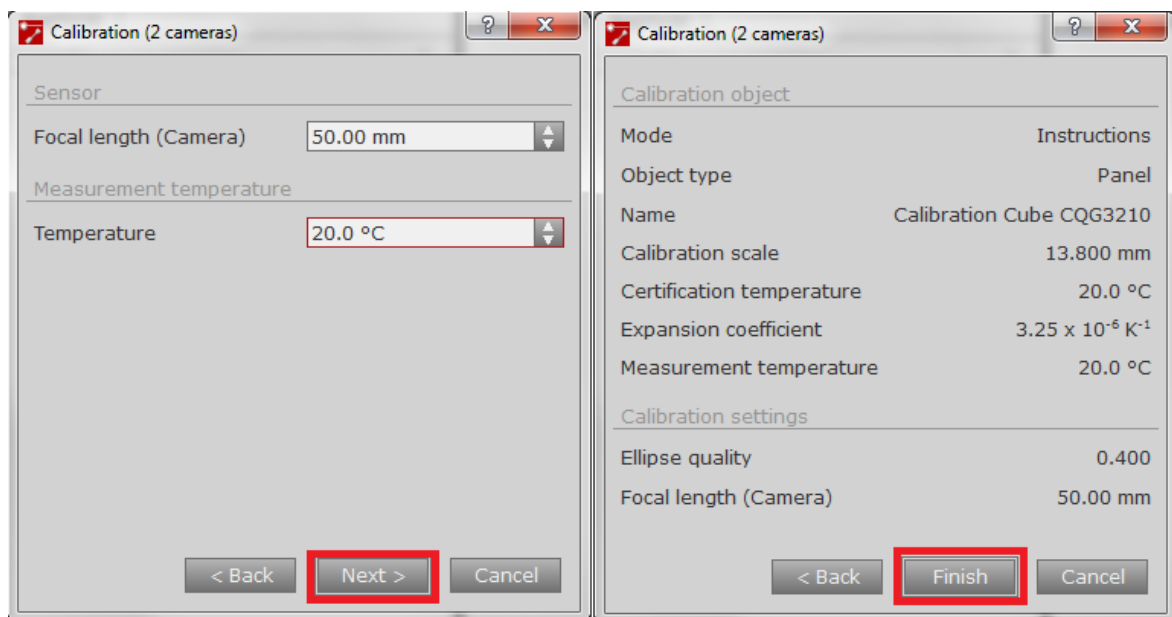


Figura 11 – Finalização da seleção do calibrador

De seguida é iniciada a calibração e o *software* indica, no canto superior esquerdo, as posições nas quais se deve colocar o calibrador (Figura 12).



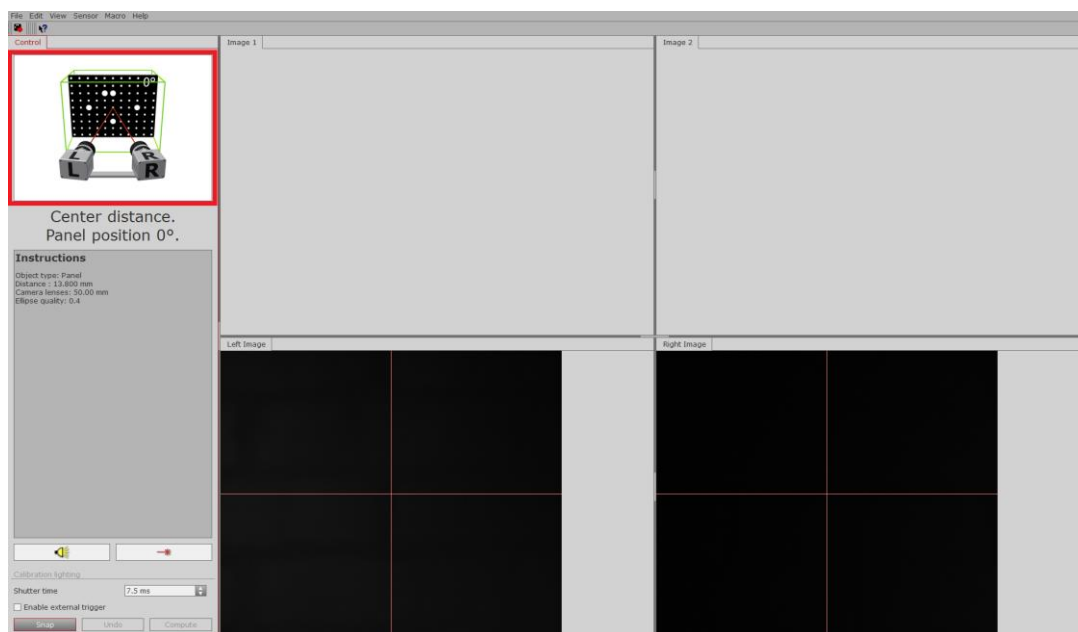


Figura 12 – Posição do calibrador indicada pelo software no canto superior esquerdo.

Vai agora ser dado o exemplo para o calibrador CQ 23×18. Para este calibrador existem 13 posições diferentes.

Na primeira posição, o calibrador é colocado à mesma distância a que se pretende colocar a amostra a testar e com a disposição da Figura 13. O laser deve ser ligado (Figura 14) e deve incidir no centro do calibrador, e o centro das imagens das câmaras devem coincidir com o que é indicado pelas linhas vermelhas da Figura 13 (Figura 15). De seguida, desliga-se o laser e ajusta-se o *shutter time* (Figura 16). O *shutter time* deve ser o maior possível, sendo que os pontos brancos do calibrador não podem ficar vermelhos, ou seja, se com o aumento do *shutter time* os pontos ficarem vermelhos, este deve ser reduzido até voltarem a ficar brancos. Finalmente, carrega-se em “*snap*” (Figura 17)

Nota: para todas as posições deve verificar-se que o laser incide no centro do calibrador e este deve ser sempre desligado antes do *snap*. O ajuste do *shutter time* deve ser sempre feito e o centro das imagens das câmaras devem sempre incidir onde as linhas vermelhas da imagem do canto superior direito indicam.

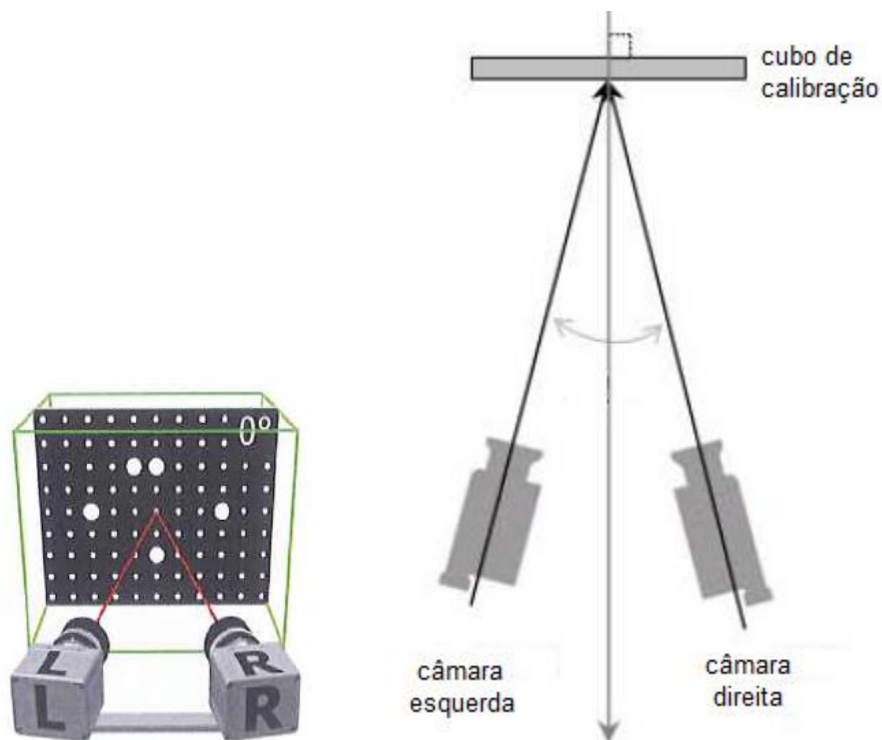


Figura 13 – Disposição do calibrador para a primeira posição.



Figura 14 – Botão para ligar laser

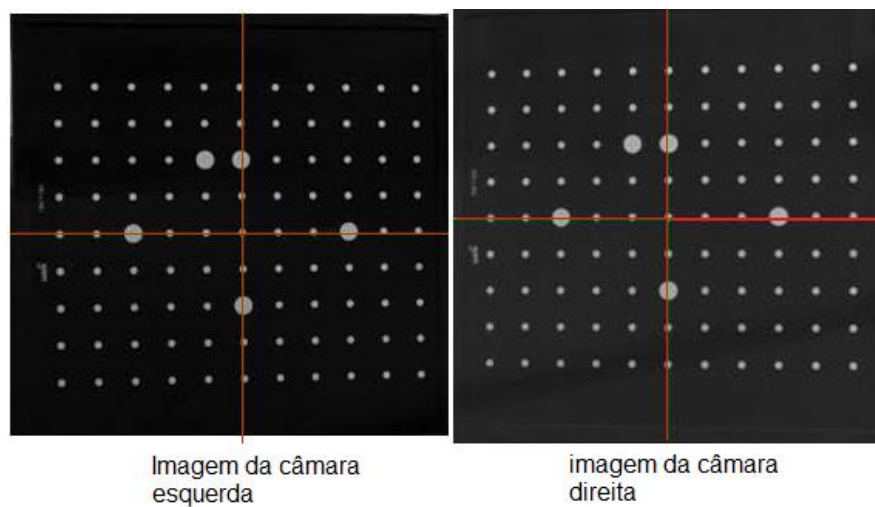


Figura 15 – Imagens das câmaras para a primeira posição

Shutter time

11.9 ms

Figura 16 – Ajuste do *shutter time*.

Snap

Undo

Compute

Figura 17 – Botão “*snap*”.

Na segunda posição (Figura 18) o calibrador é aproximado das câmaras.

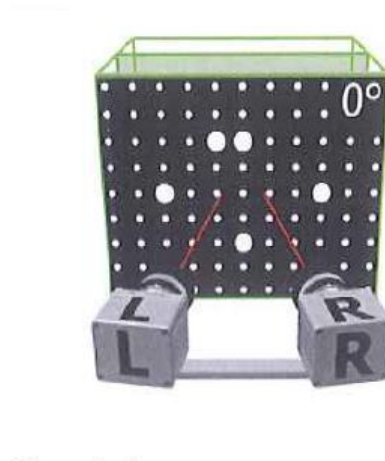


Figura 18 – Segunda posição.

Na terceira posição (Figura 19) o calibrador é afastado das câmaras.

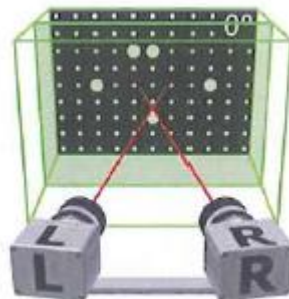


Figura 19 – Terceira posição

Na quarta posição, o calibrador volta à posição inicial, é inclinado  $40^\circ$  e deve ser subido para que fique com a configuração da Figura 20.

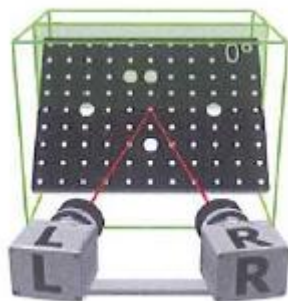


Figura 20 – Quarta posição

No caso do cubo de calibração, este pode ser inclinado no sentido oposto ao da Figura 20, pois o resultado será o mesmo e o cubo tem uma peça própria para este efeito (Figura 21).

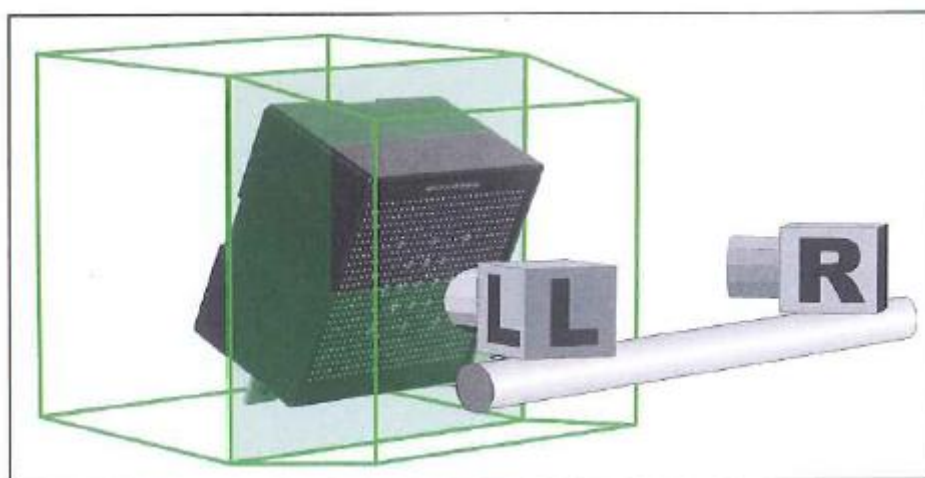


Figura 21 – Inclinação de  $40^\circ$  do cubo de calibração.

Na quinta posição (Figura 22), o cubo deve ser rodado  $180^\circ$ .

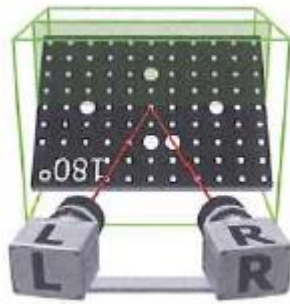


Figura 22 – Quinta posição

Para a sexta posição (Figura 23), apenas a câmara da esquerda é utilizada. Nesta posição, o cubo deve voltar à inclinação normal e deve estar perpendicular à camara da esquerda.

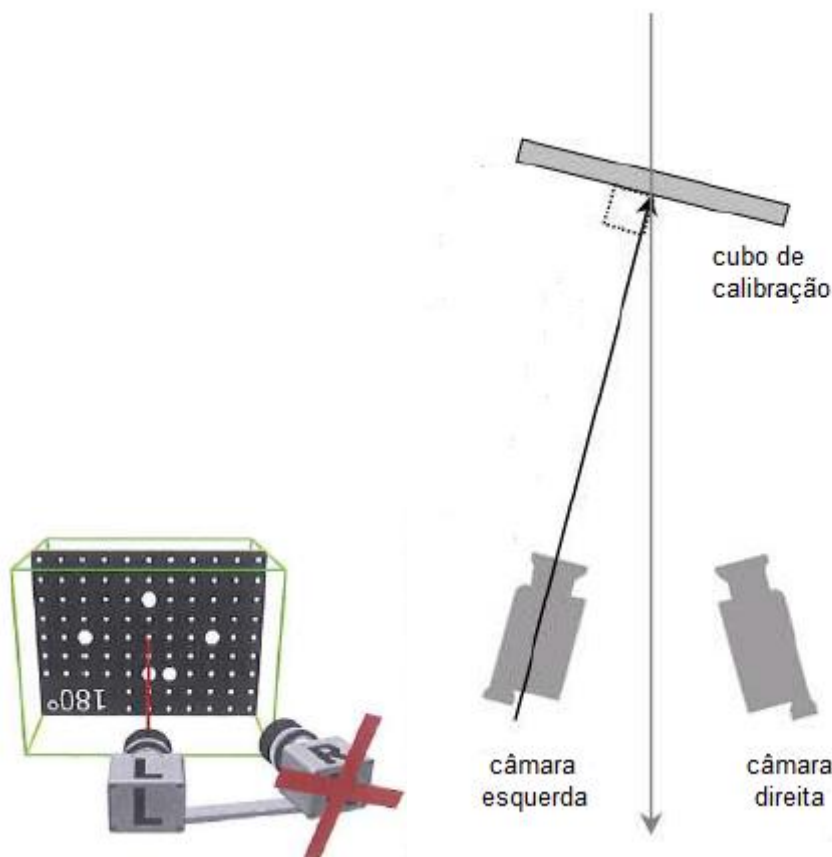


Figura 23 – Disposição do calibrador para a sexta posição.

Na sétima posição (Figura 24, o cubo é rodado 90°.

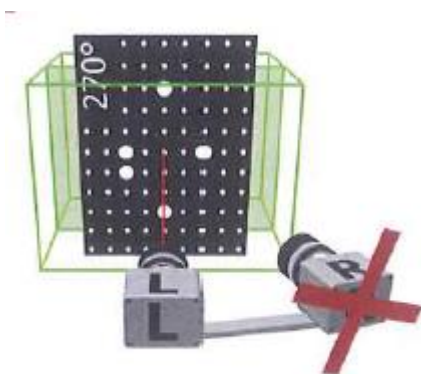


Figura 24 – Sétima posição.

Na oitava posição (Figura 25), o cubo é novamente rodado 90°.

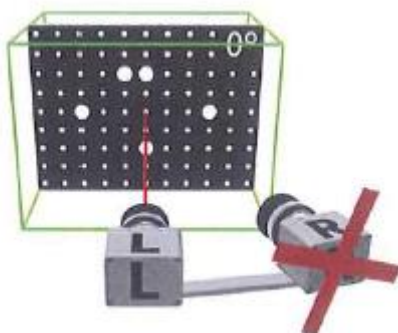


Figura 25 – Oitava posição.

Na nona posição (Figura 26), volta-se a rodar o cubo 90°.

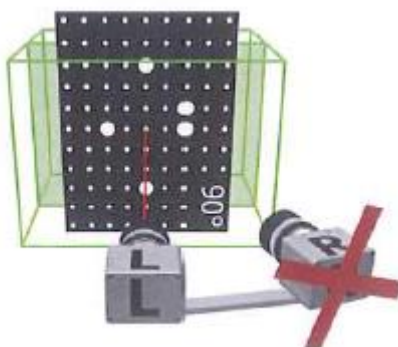


Figura 26 – Nona posição

Na décima posição (Figura 27), apenas a câmara da direita é utilizada e o cubo deve ser colocado perpendicular a esta.

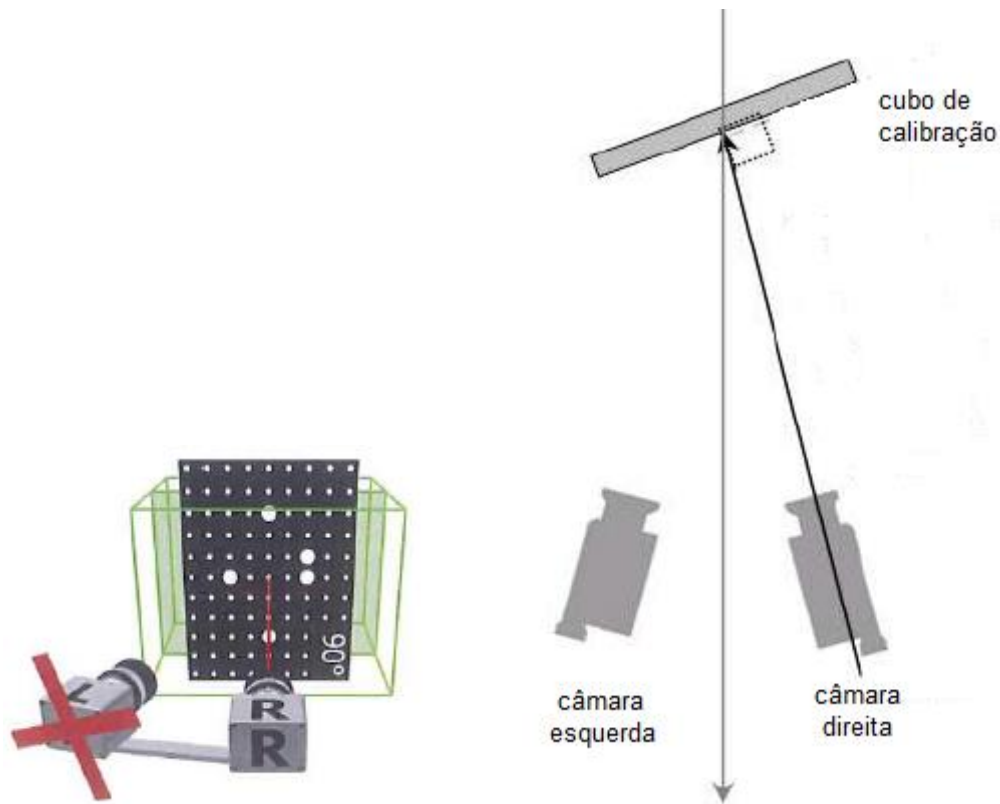


Figura 27 – Disposição do calibrador para a décima posição.

Na décima primeira posição (Figura 28), o cubo deve ser rodado 90°.

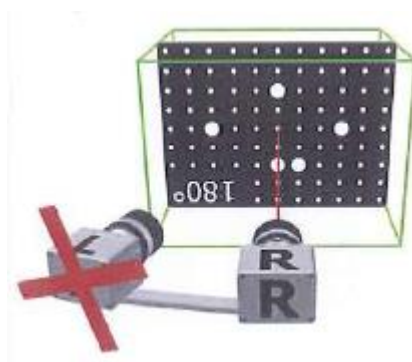


Figura 28 – Décima primeira posição.

Na décima segunda (Figura 29), posição o cubo é rodado 90° novamente.

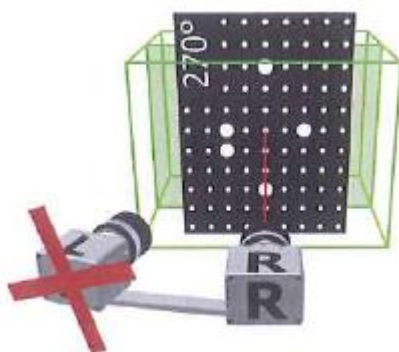


Figura 29 – Décima segunda posição

Na décima terceira posição (Figura 30), o cubo é outra vez rodado 90°

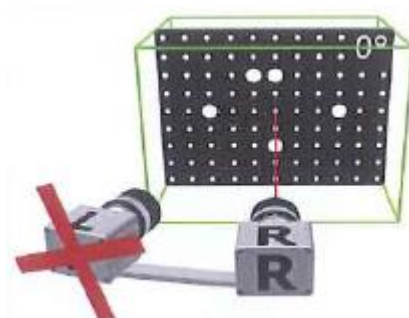


Figura 30 – Décima terceira posição

Se a calibração for bem-sucedida, aparecerá uma janela com o resultado da calibração (Figura 31).



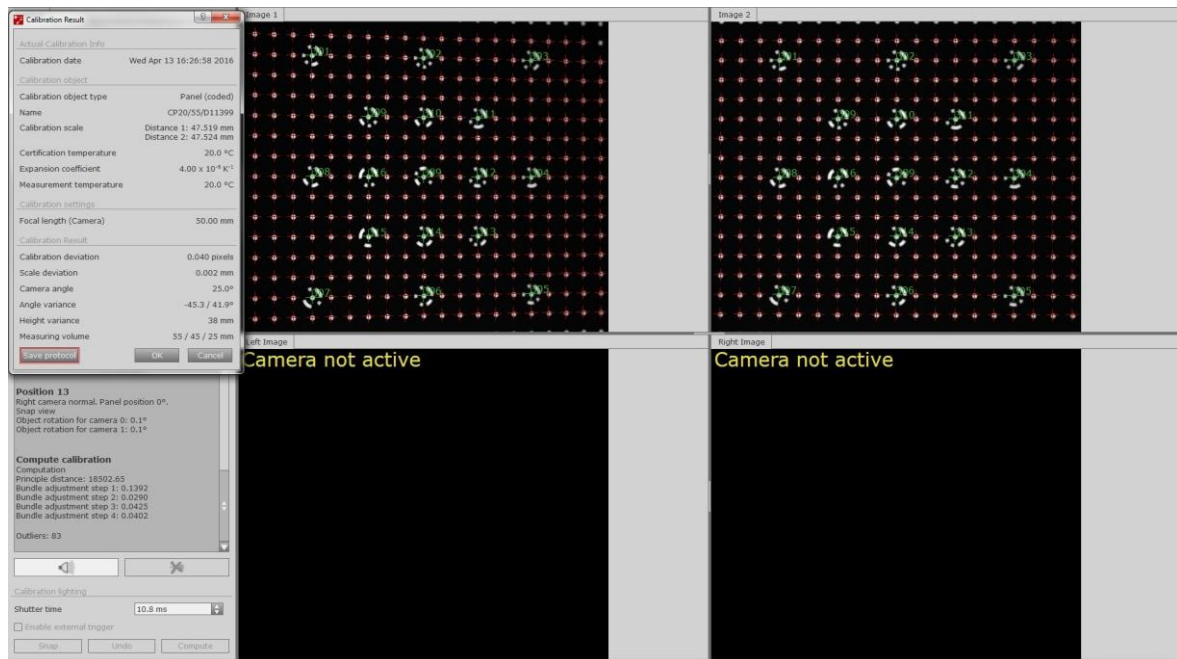


Figura 31 – Final da calibração

O desvio da calibração deve ser entre 0.01 e 0.04 pixéis (Figura 32)

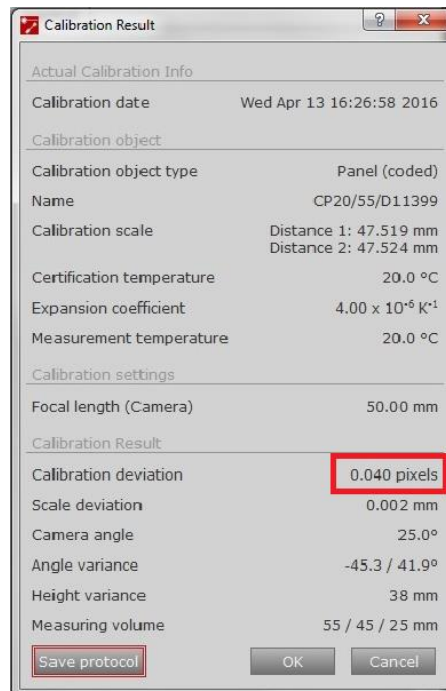


Figura 32 – Resultado da calibração

Para verificar se a calibração foi realmente bem-efetuada, pode ainda fazer-se um ensaio apenas com uma imagem e verificar se é possível adicionar *starting points* em toda a zona da amostra que se pretende analisar.